

**Zur Geschichte der Konstruktion und der Bemessung
von Tragwerken des Hochbaus
aus faserverstärkten Kunststoffen
1950 - 1980**

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieur
an der Fakultät Architektur
der
Bauhaus-Universität Weimar
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Elke Genzel

geb. 04.03.1963
Weimar, 2006

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ruth
Prof. Dr. E.h. mult. Dr. h.c. Stefan Polónyi

Tag der Disputation: 11.12.2006

Inhalt	I
Dank	III
1. Einleitung	1
1.1 Faserverstärkte Kunststoffe: Begriffe und Definitionen	7
2. Anfänge und Entwicklungen von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen	13
2.1 Die Bauherren	15
2.2 Die Beteiligten	19
Ingenieure	19
Institute	30
Koordinatoren	40
Architekten	42
3. Die Technik	45
3.1 Vorläufer und parallele Entwicklungen anderer Baustoffe	45
3.2 Die Materialgeschichte des faserverstärkten Kunststoffes	47
3.3 Die Technikgeschichte des faserverstärkten Kunststoffes	49
3.3.1 Herstellung: Verarbeitungstechniken, Schalungstechniken	49
3.3.2 Herstellung: Fügetechniken	55
4. Die Tragwerke	63
4.1 Begriffe und Tragwerkstypologie	63
Spannweiten für Tragwerke aus FVK	71
4.2 Tragwerke aus verstärkten Kunststoffen	72
4.2.1 Lineare Tragwerke	72
4.2.1.1 Biegeträger	73
4.2.1.2 Rahmen, Bogen	69
4.2.1.3 Stützen	74
4.2.1.4 Stabwerkskuppeln, Stabnetz-kuppeln, geodätische Kuppeln	74
4.3 Flächige Tragwerke	76
4.3.1 Flächige Tragwerke aus ebenen Flächen	78
4.3.1.1 Platten	78
4.3.1.2 Zellen und Kabinen, Boxen	80
4.3.1.3 Faltwerke	82
4.3.2 Flächige Tragwerke aus gekrümmten Flächen	85
Auswertung der Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ für Schalen	91
4.3.2.1 Einsinnig gekrümmte Schalen	91
4.3.2.2 Synklastische Schalen	92
4.3.2.3 Antiklastische Schalen	92
4.3.2.4 Schirme aus gekrümmten Schalenflächen	94
4.3.2.5 Freiformen	95
4.3.2.6 Biegebeanspruchte Schalen	95
4.3.3 Zugbeanspruchte Tragwerke	96
4.4 Auswertung der Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen	98
4.5 Teilung und Elementierung der Tragwerke aus FVK	95
5. Die Geschichte der Bemessung	103
5.1 Einleitung	103
5.2 Die Materialeigenschaften	104
5.3 Die Bemessung	107
5.3.1 Bemessungskonzepte	107
Die Verfahren im Einzelnen	108
5.3.2 Die Bemessungen der am Bau beteiligten Ingenieure - die Bemessungen der Pioniere	108
5.3.2.1 Nachweis durch Rechnung und Versuch	108
5.3.2.2 Nachweis allein durch Versuch	115
5.3.2.3 Ermittlung der Querschnittsabmessungen durch Vergleich und Schätzung	116
5.3.3 Die Bemessungsverfahren der Theoretiker	117
5.4 Einfluß der Lasteinwirkungen	133
5.5 Die Normen	134

6.	Bilanz	137
7.	Ausblick	139
	 Tabelle Ordnung der Tragwerke aus FVK (TodT)	 141
	 Literatur- und Quellenverzeichnis	 189
	 Anhang	 A1
	geodätische Strukturen von Richard Buckminster Fuller aus GFK: Radome 1954	A1
	geodätische Strukturen von Richard Buckminster Fuller aus GFK: Fly's Eye/Monohex 1965	A4
	Monsanto House of the Future	A5
	Tankstelle Thun	A11
	Pavillonüberdachung «Les échanges»	A14
	Bulle Six Coque	A19
	Futuro	A22
	Rondo	A25
	fg 2000	A29
	Röhrenhaus Dutler	A35
	Flughafenterminal Dubai	A40

Lebenslauf, Veröffentlichungsliste

Dank

Viele Helfer haben diese Arbeit unterstützt. Ermöglicht wurde sie durch die Initiatoren der Forschungsgruppe FOMEKK, Prof. Jürgen Ruth und Prof. Rainer Gump, denen ich herzlich danke. Welches Glück, dass in dieser Forschungsgruppe auch Pamela Voigt arbeitete. Ihr habe ich zu verdanken, dass mein Blick auf das aus faserverstärkten Kunststoffen Gebaute nicht einseitig blieb. Ihr habe ich umfassendes Recherchematerial zu verdanken und nicht zuletzt war Sie oft genug das Zugpferd, ohne das es selten gelingt, die Dinge zum Abschluss zu bringen.

Ich danke allen Kollegen, die meine Arbeit mit kritischem Blick begleitet haben. Helga Ziaja danke ich für die letzten Korrekturen und für die großzügige Bereitstellung von Logis über viele Jahre hinweg.

Meinem Mann sage ich Dank für die moralische Unterstützung, für den Glauben daran, dass alles zu bewältigen ist.

1. Einleitung

Das erste Kapitel der Geschichte des Bauens mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur wurde in Amerika geschrieben. Wir haben die erste Anwendung von FVK in der Tragstruktur eines Gebäudes einem der größten Baumeister des 20. Jh. zu verdanken - Richard Buckminster Fuller. Als Geburtsstunde des Bauens mit faserverstärkten Kunststoffen gilt die Überkuppelung der Ford Rotunde im Jahr 1954, einer geodätischen Kuppel aus Aluminiumstäben mit Dreiecksplatten aus glasfaserverstärktem Polyester der Kantenlänge 4,50 m (Abb. 1). Fuller wollte eine möglichst große Spannweite mit einem transparenten Material überbrücken. Am Anfang war also nicht die Frage, wie man einen neuen Werkstoff anwendet, sondern mit welchem Material man eine Konstruktionsform, nämlich eine Kuppel, realisiert.

Bei genauerer Betrachtung lassen sich mehrere Gründe anführen, wie es zur Einführung des FVK im Bauwesen allgemein und zur Verwendung für Tragwerke im speziellen kam.

1. Die Forschungsintentionen Einzelner sind ein erster, bereits erwähnter Grund. Als Pioniere auf ihrem Gebiet sind vor allem Richard Buckminster Fuller, Heinz Isler, Heinz Hossdorf, Z.S. Makowski, Renzo Piano zu nennen. Sie kamen zu dem neuen Werkstoff auf der Suche nach geeigneten Strukturenformen für ihre speziellen Bauaufgaben und entdeckten den neuen Werkstoff als überaus geeignet für ihre selbst gestellten Anforderungen. Es handelte sich in allen Fällen entweder um Schalen oder um Faltwerke, wofür sich FVK als sehr geeignet herausstellte. Diese Entwicklungen beginnen 1954.
2. Parallel dazu ist nach dem 2. Weltkrieg die Suche der Industrien nach neuen Märkten ein zweiter wesentlicher Grund. Zu den neuen Märkten zählte auch der Bauparkt, der von allen Industriezweigen anvisiert wurde, so auch von der chemischen Industrie. Auch hier ist das erste anzuführende Beispiel durch eine Chemieindustrie auf amerikanischem Boden initiiert. Die Firma Monsanto Chemical Comp. lässt ein Kunststoffwohnhaus entwickeln und beabsichtigt damit den Wohnungsmarkt zu bedienen (Abb. 2). Auch auf dem europäischen Kontinent sind derlei Bestrebungen der chemischen Industrie nachweisbar, allerdings zu einem späteren Zeitpunkt *Ludwig (1998)*. Hier ist die Ursache darin zu sehen, dass Europa mit den infrastrukturellen und wirtschaftlichen Folgen des Krieges zu kämpfen hatte. In Amerika stand demzufolge das bereits 1938 entwickelte Polyesterharz in Verbindung mit den 1935 erstmals großtechnisch hergestellten Glasfasern sowohl militärischen wie auch friedlichen Zwecken eher zur Verfügung als in Europa.
3. Sowohl durch die experimentellen Bauten der unter 1. genannten Forscher als auch durch die verstärkten Anstrengungen der Industrie, den FVK bekannt zu machen, wurden dessen hervorragende Eigenschaften publik. Mit diesem Werkstoff war es möglich, Flächentragwerke im Gegensatz zum Beton leicht und transparent oder farbig zu gestalten, das Material war resistent gegenüber den meisten Medien. Die freie Formbarkeit war ebenso groß wie die von Beton bzw. noch größer. Aus eben diesen Eigenschaften ergaben sich sinnvolle Anwendungen für Tragwerke.
4. Ein möglicher Grund für die Anwendung des Werkstoffes könnte auch der seit 1960 deutlich gefallene Rohstoffpreis gewesen sein. Die Aussage über die verbesserten materiellen Anwendungsbedingungen lässt sich nur bei *Hintersdorf (1972)*, 11 finden, sie stimmt aber in der Tendenz mit anderen Aussagen überein, die die Preise für Kunststoffe über 20 Jahre stabil sahen, während die Holz-, Beton-, und Stahlpreise stetig anstiegen.
5. Eine andere Vermutung liegt für die östlichen Länder Europas nahe, die infolge Rohstoffknappheit diverser Baustoffe auf der einen Seite und großer Erdölvorkommen in der Sowjetunion auf der anderen Seite möglicherweise den faserverstärkten Kunststoff nutzen wollten, um Holz oder Stahl zu substituieren. Die Entwicklung begann etwa um das Jahr 1960. Man ließ sich von den in den USA und Westeuropa gemachten Forschungen und Anwendungen inspirieren, begann mit der eigenen Entwicklung somit später *Genzel/Ackermann (19.07.2005)*. Im Gegensatz zu den westlichen Ländern waren die Initiatoren keine privaten Bauherren und auch nicht die Industrie, sondern in erster Linie verschiedene staatliche Institute. Diese Institute arbeiteten nach Forschungsplänen, die wiederum staatlich kontrolliert waren und den Bedürfnissen der sozialistischen Gesellschaft entsprachen. Dies erklärt die ausschließliche Anwendung von Tragwerken aus FVK für Industrie und Landwirtschaft und nicht für den privaten Wohnungsbau. Die vermutete Knappheit anderer Rohstoffe und ihre Substitution durch faserverstärkte Kunststoffe war jedoch nicht das ausschlaggebende Kriterium für dessen Anwendung *Genzel/Ackermann (19.07.2005)*. Ingenieure dieser Zeit berichten zwar über eklatanten Mangel an Stahl, aber die Substitution erfolgte über Beton oder Holz. Auch für die östlichen Länder, insbesondere die DDR ließ sich nachweisen, dass ein wesentlicher Grund der Anwendung von faserverstärk-

ten Kunststoffen im Bauwesen die Eroberung neuer Märkte nach dem Krieg war.

6. Neue Betätigungsfelder mussten sich nach dem 2. Weltkrieg auch die Ingenieure und Techniker erschließen, die bisher entweder in der Industrie verbundenen Forschungseinrichtungen oder freien Instituten beschäftigt waren. Hier sind es insbesondere die Flugzeugingenieure, die die Entwicklung des Bauens mit FVK in der Tragstruktur voranbringen. Ihr Know How im Umgang mit dem jungen Werkstoff ist anwendbar auf Tragwerke für Häuser. Durch freie Publikationen in Ingenieurzeitschriften und Kunststoffzeitschriften machen sie dieses Wissen publik und werden daraufhin sowohl von der Bauindustrie als auch der chemischen Industrie angesprochen. Die aus der Baubranche kommenden Pioniere (Architekten und Bauingenieure) sind zu dem Zeitpunkt ihres Beginns noch zum großen Teil auf das Wissen der Flugzeugingenieure und später auch einiger Maschinenbauer angewiesen. Später entwickeln die Bauingenieure eigene Bemessungsregeln und Konstruktionsvorschläge für FVK. Diese hinken der Entwicklung der Konstruktion neuer architektonischer Formen um etwa 5-10 Jahre hinterher. Infolge des abrupten Endes des Bauens mit FVK in der Tragstruktur kommen die wichtigsten Erkenntnisse und Regeln, gewonnen aus Forschungsarbeiten und Langzeitbeobachtungen, für die Anwendung zu spät.



Abb. 1
Blick in die Ford Rotunda mit der geodätischen Überkuppelung, USA, 1954,
Dearborn The Estate R. Buckminster Fuller

Ziele und Fragestellungen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, die Entwicklung zusammenzufassen und verlorene Erkenntnisse wieder ans Licht zu holen. Dabei ergeht kein Vorwurf an die Bauingenieure, die sowohl den Vorlauf durch die Architekten als auch andere Industriezweige immer benötigen, um ihre eigenen Regeln davon abzuleiten. Unter dem Blickwinkel „Wie würde man heute ein Tragwerk aus faserverstärkten Kunststoffen effektiv konstruieren und bemessen“, sind wesentliche Erkenntnisse einiger Architekten und Ingenieure wieder in Erinnerung zu rufen, die weder in den heutigen Empfehlungen zur Bemessung von Tragwerken aus FVK Berücksichtigung gefunden haben noch sonst als Ausgangspunkte genutzt werden. Insbesondere die großartigen Erkenntnisse einiger Ingenieure der DDR gilt es, umfänglich und in Gegenüberstellung zu den Erkenntnissen der Fachkollegen darzustellen. Dies ist insofern eine aktuelle Aufgabe, da es zur Zeit gerade noch möglich ist, die Verfasser selbst zu befragen bzw. Material vor der Vernichtung zu retten. Es ist aber nicht nur nach den Ingenieuren zu fragen, sondern nach allen Beteiligten. Wer war wofür verantwortlich, wer war ideengebend, wer finanzierte alles, wer detaillierte die Bauten, diese Fragen sind zu stellen und zu beantworten.

Auf die Darstellung der Bemessung von faserverstärkten Kunststoffen für Tragwerke wird vor dem Hintergrund der

historischen Einordnung besonderer Wert gelegt. Wie bemaßen die ersten Pioniere ihre Tragwerke, was hatten sie an Hilfsmitteln zur Verfügung? Was wussten die Ingenieure zu ihrer Zeit? Orientierten sie sich an der Bemessung anderer Materialien und wann begann man, dem Werkstoff angemessene Bemessungsregeln zu entwerfen? Welche Regeln nutzen wir heute noch von diesen und welche wurden vergessen? Diesen Fragen geht die vorliegende Arbeit nach. Die Geschichte der Bemessung von FVK in der Tragstruktur wird hiermit erstmals zeitlich zusammenhängend und strukturiert dargestellt. Insofern ist die Arbeit erstens ein Beitrag zur allgemeinen Ingenieurgeschichte des 20. Jahrhunderts und zweitens, und dieser Aspekt scheint noch wichtiger, arbeitet sie geeignete Bemessungsregeln neu heraus und gibt Hinweise auf weitere Verfahrensweisen und noch anstehende Aufgaben.

Um die geschichtlichen Hintergründe zu klären, wurde eine umfassende Bestandsaufnahme angefertigt. Dazu dienten innerhalb des Anhangs von fast 200 Projekten eine Auswahl von 10 Referenzobjekten, bei denen die gestellten Fragen detailliert beantwortet werden konnten.



Abb. 2
Monsanto House of the Future vor der Kulisse des Disney-Parks, USA,
Kalifornien, 1954 *Monsanto-Haus (1959)*

Thematische Eingrenzung:

In dieser Arbeit werden nur Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen für den Hochbau untersucht. Ein Tragwerk ist der Teil eines Gebäudes, welcher der Abtragung der auftretenden Lasten dient. Es werden nur Tragwerke betrachtet, die „tragend“ in Sinne der folgenden Lastdefinition sind und nicht bloß „selbsttragend“. Selbsttragende Bauteile werden so definiert, dass sie ihr Eigengewicht tragen und einen Teil der Verkehrslasten. Zu diesem Teil zählen die beiden Hauptlasten Wind und Schnee. Fenster sind beispielsweise typische selbsttragende Bauteile. Ein tragendes Bauteil ist im Gegensatz zum selbsttragenden in der Lage, sämtliche Lasten sicher abzuleiten, es übernimmt also auch Lasten aus anderen angrenzenden Bauteilen und leitet diese weiter. Unter den als tragend definierten Tragwerken werden nur biegesteife Tragwerke betrachtet. Das große Gebiet der biegeweichen Tragwerke (Zelte, Membrane, Pneus) erfordert eine gesonderte Betrachtung und würde den Rahmen dieser Arbeit überfordern. Bei den untersuchten Tragwerken handelt es sich um solche, die ihre Tragfunktion sowohl in einer Primärstruktur als auch in einer Sekundärstruktur bzw. in einem Composite erfüllen. Beispiel für Sekundärstrukturen sind TÖdT 4.3.2.4-1970/03, 4.3.2.2-1967/02. Beispiele für Composite sind TÖdT 4.3.1.3-1965/03, -1969/01, -1970/01, -1970/02, -1970/09.

In einer Übersicht werden alle Tragwerke aus FVK, die zwischen 1950 und 1980 erstellt wurden, gesammelt. Ihr spezifisches Lastabtragungsverhalten wird mit einer Kurzcharakteristik dargestellt, so dass sich daraus sowohl Häufigkeit als auch Eignungen ableiten lassen. Das Kapitel Tragwerke befasst sich mit den Besonderheiten, die diese Tragwerke aus FVK im Vergleich zu anderen Materialien aufweisen. Auch hier wird besonderes Augenmerk darauf gelegt, welche Tragwerke für die heutige Anwendung besonders geeignet scheinen.

Was nicht in dieser Arbeit behandelt wird, sind Aspekte der Fügung von Tragwerksteilen aus FVK, Formfindungsüberlegungen sowie architektonische Gesichtspunkte. Diese Aspekte werden in anderen Promotionen, die am gleichem Fachbereich entstehen, behandelt. Soweit es für das Verständnis der Geschichte von Bemessung und Konstruktion von

Tragwerken aus FVK nötig ist, werden die Zusammenhänge jedoch prinzipiell erläutert.

Die Arbeit wird an einer Architekturfakultät eingereicht. Infolgedessen liegt das Augenmerk auf Tragwerken und Konstruktionen, die für die Architekten von Interesse sind. Die Ingenieurbauwerke nehmen in dieser Arbeit entsprechend nicht den Raum ein, den sie geschichtlich gesehen in Gesamtmaßstab der Tragwerke aus Faserverstärkten Kunststoffen tatsächlich belegen. Besonders Silos und Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen haben einen festen Platz unter den Ingenieurbauwerken und ersetzen solche aus Metallen und Beton aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften.

Zeitliche Eingrenzung:

Der zeitliche Rahmen dieser Arbeit umfasst die Jahre 1950 bis 1980. Nachweislich das erste Tragwerk aus FVK entsteht 1954 (Abb. 3). Die Hauptzeit des Bauens mit FVK kann auf die Jahre 1968/69 festgelegt werden, während nach der Ölkrise 1973 kaum noch Bauten aus FVK errichtet wurden. Der Materialpreis hatte sich in diesem Jahr verdreifacht. Allerdings sind einige wesentliche Bemessungsregeln für Tragwerke aus FVK erst nach 1973 entstanden und zu Beginn der 1980er Jahre veröffentlicht worden.



Abb. 3
Radom auf dem Mt. Washington, USA, 1954 Dietz (1955)

Grundlagen:

Prinzipiell wird die Entwicklung am europäischen und nordamerikanischen Kontinent betrachtet. Die beachtlichen Beispiele tragender Konstruktionen aus Japan wurden nicht mit berücksichtigt, da das zur Verfügung stehende Datenmaterial lückenhaft ist. Als Recherchematerial standen die nationalen und internationalen Publikationen zur Verfügung, die sich mit Kunststoffen im allgemeinen oder faserverstärkten im speziellen befassen. Folgende Zeitschriften der Jahrgänge 1950 bis 1980, so im Erscheinungsverlauf enthalten, wurden vollständig recherchiert.

USA: *Modern Plastics*

Frankreich: *techniques et Architecture, l'architecture d'aujourd'hui, Plastiques Batiment*

Großbritannien: *Plastics for Architects and Builders.*

Deutschland, Architekturzeitschriften: *Bauen+Wohnen, Der Architekt, DBZ, db, Deutsche Architektur, Architektur & Wohnform*

Deutschland, Ingenieurzeitschriften: *Bauingenieur, VDI-Zeitschrift*

Deutschland, Kunststoffzeitschriften: *Kunststoffe, plasticonstruction, Bauen mit Kunststoffen, Element + Fertigbau,*

Schweiz: *SLA Schweizer Ingenieur- und Architektenblatt*

Die aufgeführten Zeitschriften waren für die ersten Pioniere auch das erste verfügbare Material. Mitunter publizierten einige Pioniere ihre Arbeiten an Tragwerken aus FVK auch innerhalb von Proceedings zu Symposien oder in Forschungsberichten. Diese Literatur ist uns heute zugänglich. Den Pionieren stand sie nicht zur Verfügung. Eine Sammelstelle für die weltweite Literatur zu FVK war das Institut für Bauen mit Kunststoffen (IBK) in Darmstadt. Der Vorsitzende des IBK, Amtor Schwabe, verstand sich als Vermittler zwischen den Welten und machte beim Sammeln nicht an der Landesgrenze halt. Seiner integrativen Tätigkeit ist es zu verdanken, dass nicht nur deutsche, sondern auch wesentliche internationale

Veröffentlichungen beim IBK archiviert wurden. Die Früchte seiner unermüdlichen Kontaktsuche sind in dem 1971 gegründeten Organ des IBK, der Zeitschrift *plasticconstruction*, verzeichnet. Aktuell ist das Archiv eine überaus profunde Quelle. Sie ist in einem Kellerraum der BASF untergebracht und Herr Elmar Boy gewährte freundlicherweise Zugang zu diesen Unterlagen. Durch Einsicht in das Archiv konnten bedeutende Veröffentlichungen wie der „Final Report“ über das erste Kunststoffhaus der Welt, das Monsanto House der gleichnamigen Firma, gefunden werden und somit die Geschichte des Bauens mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur nachgezeichnet werden.

Dieses Material wurde durch eine Reihe von Interviews vervollständigt. Es wurde versucht, zu allen wichtigen Vertretern des Bauens mit FVK Kontakt aufzunehmen. Ihre Einschätzungen aus heutiger Sicht können aber nur als Reflexion des Geschehen gelten. Ihre mündlichen Äußerungen stellen somit keine Originalquellen dar, diese können nur im damals Niedergeschriebenen angesehen werden.

Zur Beurteilung der Bemessung von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen und ihrer Entwicklung ist eine Quelle unverzichtbar: die statischen Berechnungen, die die Pioniere zu ihrer eigenen Erkenntnis oder zur Vorlage bei einer staatlichen beurteilenden Institution anfertigten. Hier ist die Quellenlage zwar lückenhaft, aber durch die sorgsame Aufbewahrung mancher Bauherren oder der Verfasser selbst konnte in vielen Fällen die statische Berechnung aus Nachlässen geborgen werden. Für die im Anhang verzeichneten 10 Projekte, die detailliert untersucht wurden, ergab sich folgende Ausbeute:

- in vier Fällen konnte die statische Berechnung gefunden werden (Expo'64, Rondo, fg 2000, Röhrenhaus Dutler),
- in einem Fall wurde eine ausführliche verbale Beschreibung der statischen Untersuchungen gefunden (Monsanto)
- in zwei Fällen konnte die statische Berechnung nicht gefunden werden, obgleich sie gesichert erstellt wurde (Tankstelle Thun, Futuro: verschollen),
- in zwei Fällen konnte die statische Berechnung nicht gefunden werden, und es konnte auch nicht nachgewiesen werden, ob eine erstellt wurde (geodätische Kuppeln von Buckminster-Fuller, Flughafen Dubai)
- in einem Fall wurde nachgewiesen, dass auf einen statischen Nachweis verzichtet wurde (Bulle Six Coque).

Die gefundenen Originalunterlagen stellen einen derart wertvollen Fundus dar, dass im Zuge dieser Arbeit beschlossen wurde, sie vor Ort – an der Bauhaus-Universität Weimar – zu archivieren. Das 2005 neu gegründete „Archiv der Moderne“ wird diese Unterlagen aufnehmen. Gemeinsam mit den Zeitschriften, Büchern und Interviews bilden sie die primäre Grundlage der vorliegenden Arbeit. Sekundär spielen allgemeine baugeschichtliche Fachliteratur aus heutiger Zeit sowie bestehende und abgelöste Normen zu FVK eine Rolle.

1.1 Faserverstärkte Kunststoffe: Begriffe und Definitionen

Faserverstärkte Kunststoffe sind Verbundwerkstoffe aus zwei Komponenten: dem Harz als Bindemittel und den hochfesten Fasern als Verstärkungsmaterial. Unverstärkte Kunststoffe, die nur aus Harz bestehen, werden für tragende Zwecke im Bauwesen kaum eingesetzt, sie werden deshalb in dieser Arbeit nicht näher beschrieben.

Unter den **Harzen** versteht man makromolekulare Werkstoffe, welche durch chemische Umwandlung von Naturprodukten oder durch Synthese aus den Primärprodukten Kohle, Erdöl oder Erdgas hergestellt werden. In der DDR wurden die Harze als Plaste bezeichnet. In der BRD verwendete man den Begriff „Plastik“ sowohl für Kunststoffe als auch verwirrenderweise für das Werk der Bildhauerkunst, welches auch im heutigen Sprachgebrauch noch üblich ist. Nachfolgend im Text werden weitere, in der DDR benannte und abweichende Begriffe als Klammerausdruck beigefügt.

Die Harze werden nach der Art ihrer Struktur unterteilt in:

- *Thermoplastische Kunststoffe* oder *Thermoplaste* oder *Plastomere* (DDR: *Thermoplaste*) besitzen eine fadenförmige, lineare Makromolekularstruktur. Sie erhärten durch Abkühlung, die erreichte Zustandsänderung ist reversibel. Thermoplastische Kunststoffe können durch Erwärmung beliebig oft in den plastischen Zustand überführt werden. Infolge ihrer fehlenden räumlichen Vernetzung besitzen Thermoplaste eine deutlich größere Kriechneigung unter Last und Temperatur im Gegensatz zu Duroplasten, was sie für die Anwendung in einer Tragstruktur nur begrenzt einsetzbar macht. Thermoplaste sind schweißbar. Zu den im Bauwesen eingesetzten Thermoplasten zählen u.a. PMMA (Polymethylmethacrylat) sowie PVC hart und PVC weich (Polyvinylchlorid), die als Fassadenelemente und Fensterrahmenkonstruktion Verwendung finden.
- *Duroplastische Kunststoffe* oder *Duroplaste* oder *Duomere* (DDR: *Duroplaste*) besitzen eine räumliche, dreidimensional vernetzte Makromolekularstruktur. Sie werden durch einen Härtungsprozess geformt, der irreversibel ist. Der Härtungsprozess erfolgt in der Regel unter Druck und Temperatur. Manche Duomere erhärten auch drucklos bei Raumtemperatur. Dazu zählen die ungesättigten Polyesterharze und die Epoxidharze, die beiden wesentlichen Harze, die in Verbindung mit Verstärkungsfasern für den Bau von Tragwerken verwendet wurden. Höhere Festigkeiten faserverstärkter Duomere werden allerdings nur unter Druck oder Temperatur erreicht.
- *Elastomere* sind lose vernetzte Polymere und besitzen ein gummielastisches Verhalten. Sie werden vielfach im Bauwesen als Lager oder Fugendichtung eingesetzt, allerdings nicht in einer Tragstruktur.

Werden den Harzen Fasern beigemischt, so entstehen die **faserverstärkten Kunststoffe** (DDR: faserverstärkte Plaste). Die verstärkten Thermoplaste haben für das Bauwesen keine Bedeutung. Von den verstärkten Duroplasten haben die ungesättigten Polyesterharze und die Epoxidharze aufgrund ihres Preis-Leistungs-Verhältnisses die größte Bedeutung für die Verwendung in einer Tragstruktur, daneben spielen faserverstärkte Phenolharze, Melaminharze, Silikonharze und Kohlenwasserstoffharze kaum eine Rolle.

Als **Verstärkungsfasern** kommen Glasfasern, Aramidfasern oder Kohlenfasern in Betracht. Die Fasern werden in textil verarbeiteter Form verwendet. Man unterscheidet Rovings (Strangmaterial) von Matten (gebundene oder nicht gebundene Stapelfasern) oder Gewebe mit verschiedener textiler Bindung. Im betrachteten Zeitraum der vorliegenden Arbeit spielen Aramid- und Kohlenfasern noch keine Rolle für das Bauen, z.T. wurden sie erst später entwickelt (sh. 3.2). Ihre Bedeutung hat sich jedoch in den vergangenen Jahren bis heute (2005) deutlich vergrößert. Besonders der kohlenfaserverstärkte Kunststoff (CFK) ist ein Hochleistungswerkstoff, der für außerordentlich beanspruchte Tragstrukturen beispielsweise im Brückenbau Verwendung findet. Je nach Faseranteil erreichen CFK eine Festigkeit, die doppelt so hoch ist wie die von Stahl bei vergleichbarem E-Modul. Der Preis ist allerdings um das 4-fache größer als der von Stahl. Heute finden sich CFK-Lamellen auf dem Markt, die einen Anteil von 70% Kohlenfasern in einer Epoxidharz-Matrix aufweisen. Aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit und Medienresistenz werden sie heute standardmäßig für die Sanierung von Bauwerken angewandt, die im Zugbereich versagen.

Während der in dieser Arbeit beschriebenen Pionierphase des Bauens mit FVK in der Tragstruktur wurde vornehmlich **glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz** verwendet. Folgende Bezeichnungen waren gebräuchlich:

GF-UP	glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz
GUP	glasfaserverstärktes ungesättigtes Polyesterharz
GfP	glasfaserverstärktes Polyesterharz
GFK	Glasfaser-Kunststoff
GRP	glas-fiber reinforced plastics

Neben glasfaserverstärktem Polyester fand auch **glasfaserverstärktes Epoxidharz** Verwendung für tragende Kunststoffe. Es hat weitgehend ähnliche Eigenschaften wie das ungesättigte Polyesterharz. Im Gegensatz zu Polyester lässt es sich besser verarbeiten, ist nach Aushärtung klarer und durchscheinender, lässt sich gleichmäßiger einfärben und schrumpft geringer beim Aushärten. Neben einem höheren Preis hat Epoxidharz jedoch den Nachteil, dass sich gesundheitsschädigende Dämpfe beim Aushärtungsvorgang entwickeln. Epoxidharz ist somit nur unter Einhaltung besonderer Vorsichtsmaßnahmen verwendbar.

Die Eigenschaften der GFK sind aufgrund ihrer möglichen Einzelkomponenten (Faser-Harz-Mengenverhältnis, Eigenschaften und Orientierung der Fasern) vielfältig. Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den Grundkomponenten ist daher eines der größten Probleme, das die Konstrukteure beim Bemessen einer Tragkonstruktion zu bewältigen hatten. Es wird im Kapitel Bemessung behandelt.

GFK besitzt eine Reihe positiver Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Materialien.

Geringes Gewicht: Glasfaserverstärktes Polyester mit einem Glasanteil von 30 % hat ein spezifisches Gewicht von ca. 15 kN/m³, ist also primär um 40 % leichter als Beton oder Glas. Bei einem höheren Glasmassenanteil kann das spezifische Gewicht leicht auf 20 bis 25 kN/m³ ansteigen (Abb. 4).

Hohe Ergiebigkeit des Tragverhaltens: Unter Ergiebigkeit versteht man das Verhältnis von Festigkeit zum spezifischen Gewicht. Das als Reißlänge bezeichnete Verhältnis ist für GFK besonders günstig und kann sogar die Werte von Stahl übersteigen (Abb. 5).

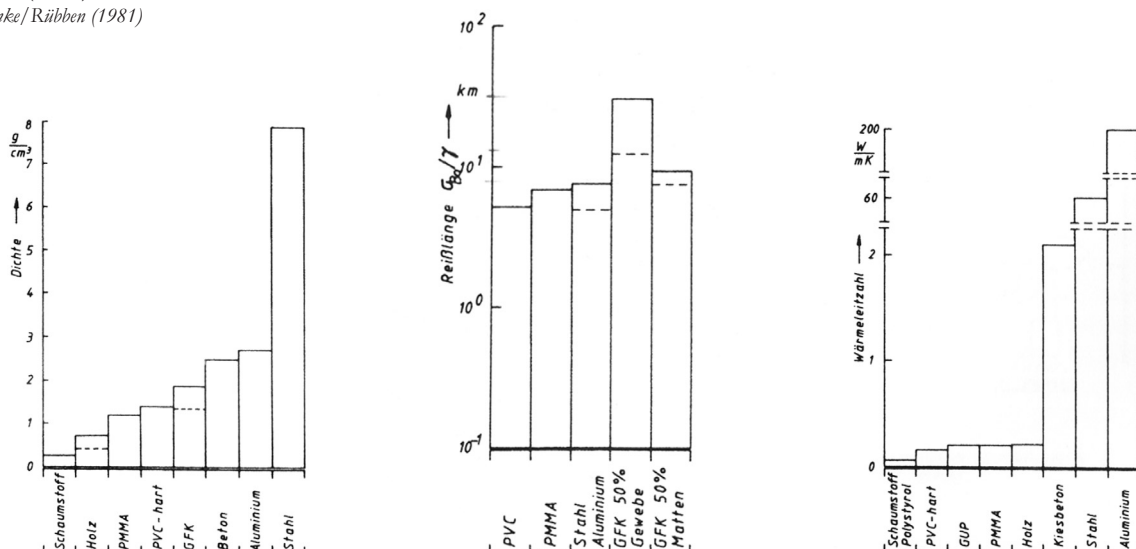
Hohe Zugfestigkeit: Die Zugfestigkeit des GFK ist direkt abhängig vom Anteil der Glasfasern (Abb. 6). Der Glasfaseranteil wird wiederum durch die Herstellungstechnik bestimmt, wobei mit zunehmender Mechanisierung der Verfahren der Faseranteil und damit die Zugfestigkeit ansteigt. Die in vorliegender Arbeit besprochenen Bauteile wurden vornehmlich im handwerklichen oder teilmaschinellen Verfahren erzeugt, für das ein Faseranteil von 25-30 % charakteristisch ist. Abb. 7 und Abb. 10a geben Auskunft über die erreichbaren Festigkeiten im Vergleich mit anderen Werkstoffen. Bei höherem Glasmassenanteil beträgt die Zugfestigkeit von GFP das 1,5- bis 2-fache der Zugfestigkeit von Stahl.

Abb. 4 (links) spezifisches Gewicht

Abb. 5 (mitte) Reißlänge

Abb. 8 (rechts) Wärmeleitzahl

Domke/Rübben (1981)



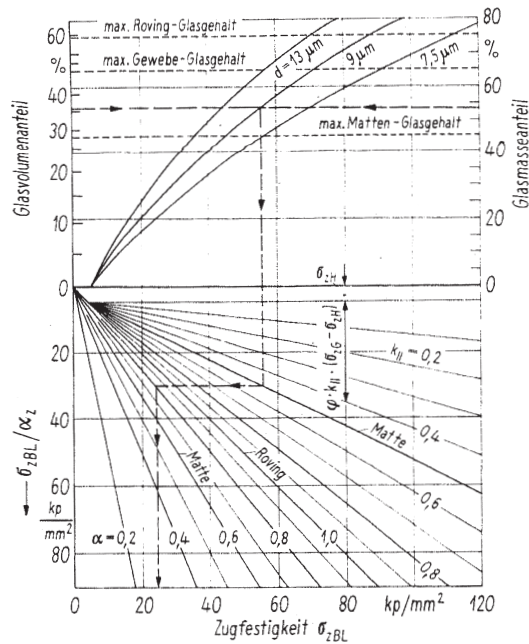


Abb. 6 Theoretische Abhängigkeit der Zugfestigkeit von GFK-Laminaten vom Glasgehalt

Bernert/Hintersdorf (1966), 849

Lichtdurchlässigkeit: Als lichtdurchlässiges Material ist GFK geeignet als Glasersatz. Gegenüber Glas ist er weniger spröde, ballwurfsicher und besitzt günstigere Wärmedämmwerte. Folgerichtig wurde GFK seit Anbeginn für Schwimm- und Sporthallen sowie für Gewächshäuser vielfach verwendet. GFP erreicht allerdings keine höhere Lichtdurchlässigkeit als 85 %, hingegen erreicht Glas 100 %.

Abb. 7 Kennzahlen von Konstruktionswerkstoffen von Platten Hintersdorf (1972), 118

Werkstoff	Glas- masse- anteil [%]	Dichte [kg/dm³]	Zug- festigkeit [kp/mm²]	Druck- festigkeit [kp/mm²]	Schub- festigkeit [kp/mm²]	E-Modul [kp/mm²]	Schub- modul [kp/mm²]	Linearer Wärme- ausdehnungs- koeffizient 10 ⁻⁶ [grd ⁻¹]
PVC	—	1,38	5,0	8,0	3,5	250	90	80
PVC, glasfaserverstärkt	30	1,60	12,0	15,0	8,0	850	330	30
GUP, faserharzgespritzt	25	1,40	7,0	8,5	4,7	700	270	32
GUP, mattenverstärkt	30	1,45	10,5	13,0	7,0	850	330	28
GUP, gewebeverstärkt	—	—	—	—	—	—	—	—
$k_{II} = 0,5$	50	1,67	18,0	16,5	4,0 ¹⁾	1700	230 ¹⁾	16
GUP, gewebeverstärkt	—	—	—	—	—	—	—	—
$k_{II} = 0,9$	60	1,78	52,0	36,0	4,0 ¹⁾	3000	280 ¹⁾	12
GUP, rovingverstärkt	—	—	—	—	—	—	—	—
$k_{II} = 1,0$	70	1,93	80,0	56,0	4,0 ¹⁾	4000	350 ¹⁾	8
Harte Faserplatten aus Holz	—	1,00	2,5	2,3	1,5	400	150	9,5
Faserplatten, extrahart	—	1,05	3,0	3,0	2,0	800	300	9,0
Sprelacart	—	1,50	11,0	15,0	10,0	1200	460	—
Asbestzement, gepreßt	—	1,9	1,1	4,4	0,7	1900	700	13
Stahl St 38	—	7,80	38,0	38,0	25,0	21000	8000	—
Stahl C 60	—	7,85	85,0	85,0	55,0	21000	8000	—
AlMg 3F 26	—	2,66	26,0	26,0	17,0	7000	2700	—
Kiefernholz	—	0,56	8,0	—	—	1000	—	—
Hartschaum 20	—	0,02	0,01	0,01	0,006	0,4	0,2	—
Hartschaum 60	—	0,06	0,04	0,04	0,024	1,2	0,6	—
Papierwabe	—	—	—	—	—	—	—	—
PKA 25/19	—	0,019	0,03	0,03	0,015	7,3	1,7	—
Beton B 160	—	2,2	—	1,6	—	—	—	—

1) Parallel zur Faserrichtung.

Wärmedämmfähigkeit/ Temperaturempfindlichkeit: GFK besitzt in etwa die gleiche Wärmeleitzahl wie Holz (Abb. 8). Im Gegensatz zu Stahl oder Beton ergibt sich daraus bei Verwendung von Tragelementen aus GFK im Fassadenbereich keine Kältebrücke. Wurde GFK als Deckschicht in einer Stützkernkonstruktion verwendet, so konnten raumabschlie-

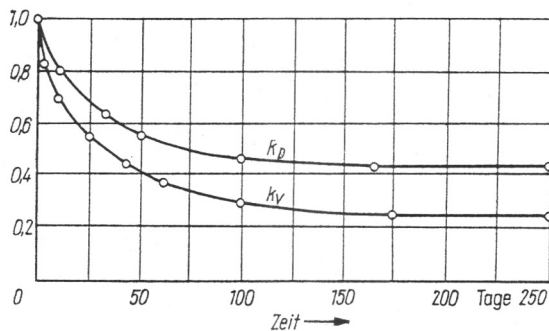


Abb. 9 Schematische Darstellung der Kurven des Koeffizienten der Dauerstandsfestigkeit k_D und des Zeit-Verformungs-Koeffizienten k_V Gericke (1969), 433

Bende, tragende und wärmedämmende Elemente erzeugt werden. Alle mit FVK hergestellten Wohn- oder Ferienhäuser besitzen folgerichtig eine Stützkernkonstruktion, während die einlagige Verwendung des GFK für doppelt gekrümmte Schalen und Faltwerke für Industriebauten oder Bauwerke ohne Anforderung an eine Wärmedämmung ausreichend ist. Neben diesen vorteilhaften thermischen Eigenschaften ist die Veränderung der mechanischen Eigenschaften der glasfaserverstärkten Kunststoffe unter erhöhter Temperatur von Nachteil (sh. 5.3).

Dichtigkeit: Tragelemente aus GFK können als praktisch wasserdicht gelten, wenn sie mit einem zusätzlichen Anstrich (Gelcoatschicht) ausgerüstet sind. Weiterhin sind sie annähernd gasdicht, stellen also eine wirkungsvolle Dampfbremse dar.

Medienresistenz: Ein großer Vorteil gegenüber anderen Werkstoffen besteht in der hohen Medienresistenz gegenüber Säuren und Basen. GFK können nicht rosten oder faulen. Nachteilig wirkt sich allerdings die hohe Empfindlichkeit gegenüber Sonnenlicht aus. Unter UV-Strahlung wie auch unter Temperaturbelastung reduzieren sich die Materialwiderstände beträchtlich bis zu einem Bruchteil der Kurzzeitfestigkeit (sh. 5.3).

Niedriger E-Modul: Der E-Modul glasfaserverstärkter Kunststoffe ist niedriger als bei klassischen Baustoffen. GFP erreicht bei einem Glasfaseranteil von 40% einen E-Modul von 8.000 N/mm^2 , was in etwa 80% des E-Moduls von Nadelholz in Faserrichtung bzw. einem Fünfundzwanzigstel dessen von Stahl entspricht (Abb. 7). In Verbindung mit der Tatsache, das glasfaserverstärktes Polyester aufgrund seines hohen Preises nur als Tragkonstruktion mit einer Bauteildimension nicht dicker als 3-5 mm in Frage kommt, ergibt sich daraus die Konsequenz der Verwendung von Tragkonstruktionen, bei denen der niedrige E-Modul eine untergeordnete Rolle spielt. Dies können einfach oder doppelt gekrümmte Tragkonstruktionen oder Stützkernkonstruktionen sein.

Veränderlichkeit der Eigenschaften: Das größte Problem der GFK besteht in der Veränderlichkeit der Eigenschaften über die Zeit. Unter Last und Temperaturbeanspruchung kriecht der Werkstoff. Im Gegensatz zu einem kurzzeitbeanspruchten Bauteil kann ein langzeitbeanspruchtes Bauteil nur bis zu 30 % der Kurzzeitlast aufnehmen (Abb. 9) (sh. 5.3).

Brandverhalten: Das Brandverhalten ist in erster Linie vom Bindemittel (Harz) abhängig. Ungesättigtes Polyester ist schwerentflammbar (Baustoffklasse B1 nach DIN 4102), durch Zusätze konnte die Brennbarkeit so weit herabgemindert werden, das die Harze selbstverlöschend sind. Duroplastische Kunststoffe, darunter ungesättigte Polyesterharze und Epoxidharze mit und ohne Glasfaserverstärkung, gelten in keinem Falle als „brennend abfallend“ oder „abtropfend“ Saechtling (1973), 563. Hingegen erreichen Bauteile aus GFK in einem Gebäude in der Regel keine ausreichende Feuerwiderstandsdauer zur Einreihung in eine Feuerwiderstandsklasse Saechtling (1973), 563. Mehrgeschossige Gebäude mit Brandanforderungen F 90 konnten und können bis heute mit GFK nicht errichtet werden. In Einzelfällen wurde eine Feuerwiderstandsklasse F 30 attestiert Feierbach, Zulassung Bausystem fg 2000 (1973). Mit tragenden Bauteilen wurden in der Regel nur eingeschossige Gebäude errichtet. Das genaue Verhalten glasfaserverstärkter Polyesterharze im Brandfall bezüglich der Brandwiderstandsdauer und bezüglich des Auftretens toxischer Zersetzungsprodukte wurde bis heute nicht umfassend erforscht und dokumentiert und zählt zu den dringlichsten Aufgaben der Zukunft Genzel/Ludwig (25.04.2006).

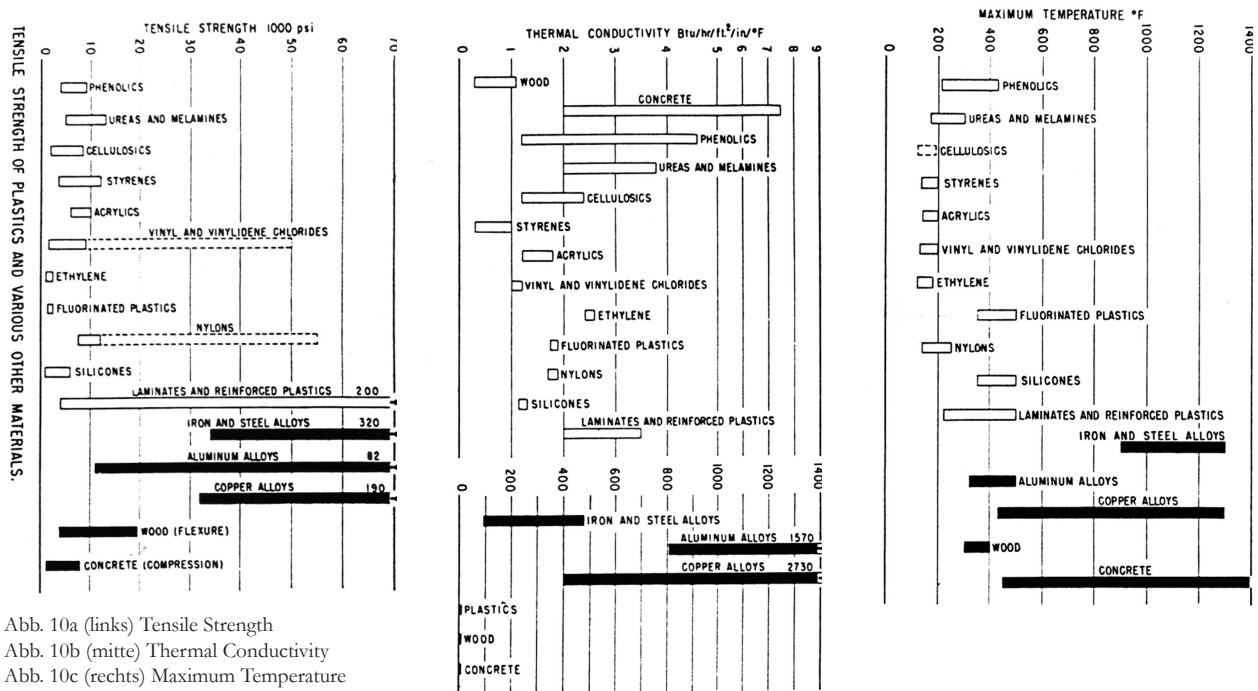


Abb. 10a (links) Tensile Strength

Abb. 10b (mitte) Thermal Conductivity

Abb. 10c (rechts) Maximum Temperature

Dietz (1956), 2-3

Schallschutz:

Schallschutztechnisch birgt das Bauen mit glasfaserverstärkten Kunststoffen zwei wesentliche Probleme. Das erste Problem betrifft die Akustik. Die meisten Oberflächen von Bauteilen aus GFP sind als schallhart einzuordnen. Um eine angenehme Akustik zu erreichen, sind zusätzliche schallschluckende Maßnahmen einzuleiten. In den in dieser Arbeit angeführten Beispielen wurde dieses Problem häufig durch textile Auslegware oder Wandbespannung gelöst. Sind die GFP-Oberflächen offenporig, d.h. ohne Gelcoatschicht ausgerüstet, gelten sie nicht als schallhart. Schallweiche und gleichzeitig dichte und medienresistente Bauteile aus GFP sind entsprechend ausgeschlossen Gierlich (25.07.2005). Eine deutliche Verbesserung und Einordnung als schallweiches Material erfahren die Stützkernkonstruktionen. Nach Laeis (1968) erreichen die Schaumkunststoffe in Sandwichkonstruktionen sogar einen Schallwellenwiderstand, der fast an den der Luft herankommt. Noch schallweicher verhalten sich Konstruktionen aus Deckschichten und Mineralwollkern.

Die zweite Problematik betrifft den Luftschallschutz. Bauteile aus FVK erreichen aufgrund ihrer Leichtigkeit wie alle Leichtbauweisen nur geringe Schalldämmmaße. Weder mit einlagigen Konstruktionen noch mit Stützkernkonstruktionen werden Luftschalldämmmaße größer als 30 db erreicht. Für eine Verbesserung des genannten Wertes sind doppelte Stützkernkonstruktionen, wie sie beispielsweise beim Monsanto House vorzufinden waren, nötig. Der Einfluss von Wölbungen von Bauteilen aus FVK auf das Luftschalldämmmaß ist weitgehend unbekannt und unerforscht. Eine Einschätzung des vorhandenen Luftschalldämmmaßes für den konkreten Anwendungsfall gestaltet sich entsprechend schwierig und ist nur durch Untersuchungen in situ genau zu klären.

Eine Vergleichbarkeit von GFK mit anderen Materialien bietet die Abb. 149: „Massebezogene Eigenschaften verschiedener Konstruktionswerkstoffe“. Der Kennwert E/ρ ist ein Vergleichsmaß für die Durchbiegung infolge Eigenlast bei gleichem Biegequerschnitt. Hier sind die metallischen Werkstoffe trotz ihrer höheren Dichte günstiger als die faserverstärkten Kunststoffe. Biegebeanspruchte Tragwerke aus GFK sind demnach so zu konstruieren, dass dieser Nachteil durch eine Auflösung des Querschnittes ausgeglichen wird. Die Kennzahl $\sqrt{E/\rho}$ erlaubt eine Bewertung des Werkstoffes als Knickstab. Hier liegen GFK im gleichen Eignungsbereich wie Stahl. Für zugbeanspruchte Konstruktionen sind GFK besonders geeignet. Der Wert der Reißlänge σ/ρ liegt bereits für Polyester mit 25 % Glasfaseranteil über dem Wert von Stahl. Setzt man allerdings die massebezogenen Festigkeiten zu den Preisen je kg der Werkstoffe ins Verhältnis, so erhält man den Vergleichswert, der aussagt, wieviel eine Krafteinheit der zu übertragenden Zugkraft pro km Länge kostet. Die Werte in Abb. 149 entsprechenden zwar nicht dem aktuellen Stand, die Verhältnismäßigkeit indes ist geblieben.

Die Vielzahl der positiven Eigenschaften macht deutlich, dass sich GFK sehr gut als Werkstoff für tragende Strukturen eignet. Bevor der FVK für Tragwerke verwendet wurde, hatte man ihn bereits für den Flugzeugleichtbau und den Bau von Booten entdeckt. Bereits 1916 erhielt R. Kemp ein Patent für die Herstellung eines vollständig aus faserverstärkten Kunststoffen bestehenden Flugzeuges www.lkt.uni-erlangen.de. Etwa um 1940 entwickelte und testete man Flugzeug-Tragwerksteile, die in Stützkernbauweise mit GFK-Deckschichten hergestellt wurden. Die Entwicklungen und Kenntnisse aus dem Flugzeugleichtbau mit FVK konnten vollkommen für das Bauen von Tragwerken für Hochbauten angewandt werden. Nach dem 2. Weltkrieg stellten die Flugzeugbauer ihr Wissen bezüglich der Bauweisen und Konstruktionen, bezüglich der mechanischen Kennwerte als auch bezüglich der Bemessung von Bauteilen aus FVK in den Dienst der Bauindustrie (sh. 2.). Auch der Bau von Kunststoffbooten etablierte sich vor dem Bauen mit FVK in der Tragstruktur. Vom Bootsbau konnte die Herstellungstechnologie für Tragwerke aus FVK übernommen werden (sh. 3.3.1).

Etwa um 1950 hatte eine Reihe von Personen ein deutliches Interesse an der Verwendung von GFK für den Bau von Tragwerken. Die Interessen der Bauherren, Architekten, Ingenieure und Institute waren unterschiedlichster Natur. Sie werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Die Geschichte des Bauens mit Kunststoffen in den Pionierjahren 1950 bis 1980 kann ohne das Beleuchten der Aktivitäten Einzelner oder Gruppen nicht nachvollzogen werden. Insofern nimmt das Kapitel 2.2 „Die Beteiligten“ einen nicht unerheblichen Raum ein.

Die vorliegende Arbeit möchte neben der geschichtlichen Einordnung auch das aktuelle Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur von Hochbauten voranzubringen. Für eine Wiederbelebung ist es allerdings unumgänglich, die gravierenden Probleme des Brandschutzes zu erforschen und zu lösen, dem geringen E-Modul durch richtige Entwurfsansätze zu begegnen und das Material für die Anwendung im Bauwesen zu klassifizieren. Die vorliegende Arbeit wurde erstellt in der Hoffnung, die Möglichkeiten des Einsatzes FVK in einer Tragstruktur im Hochbau aufzuzeigen sowie Defizite zu benennen und Forschungen anzuregen, die der Beseitigung dieser Defizite dienen.

2. Anfänge und Entwicklungen von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen

Mit Sicherheit wäre die Entwicklung von Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen ohne den 2. Weltkrieg anders verlaufen. Alle Entwicklungen auf dem chemischen Sektor fanden sofort Anwendung, indem sie für militärische Zwecke genutzt wurden. Das vom Amerikaner Carleton Ellis 1933 entdeckte Acrylglas wird sogleich als Glasersatz im Flugzeugbau des Militärs eingesetzt *Hufnagl (1997)*. Dies geschieht zwar vor dem 2. Weltkrieg, aber doch in Kenntnis der Bestrebungen Deutschlands, Italiens und Japans, die weltpolitische Ordnung neu aufzuteilen. Etwa 10 Jahre später - 1942 - sind sowohl Glasfasern als auch Polyurethan mittlerweile herstellbar und finden erste Sandwichbauteile aus glasfaserverstärktem Polyester und Balsaholz als Kernmaterial Verwendung für Flugzeuge *Ehrenstein (1992)*. Das Ende des Krieges fällt zusammen mit der Produktion von Wabenkernen (Honeycombs) 1945 durch L.S. Meyer *Ehrenstein (1992)* und der Entwicklung des Faserwickelverfahrens, welches im Bauwesen insbesondere für Rohre und Silos Verwendung findet. Auch die Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Glasfaserkunststoffen waren weiterentwickelt worden. Die Verfahren, die Werkstoffe, die Bauweisen und die Ingenieure, die diese entwickelt hatten, suchten nun nach 1945 nach neuen Anwendungen. Neben der Automobil- und Elektroindustrie war auch das Bauwesen Ziel der Überlegungen der Chemieindustrie.

Warum konnte nun die Chemieindustrie der USA als erste ihre Ziele in die Tat umsetzen? Amerika hatte gegenüber Europa einen Vorsprung, was die Anwendung von FVK betrifft. Hier sind folgende Gründe anzuführen:

- Amerika war zwar kriegsbeteiligt, hatte aber nicht in dem Maße wie Europa mit den wirtschaftlichen Folgen und der Zerstörung zu kämpfen
- demzufolge stand das ungesättigte Polyesterharz, welches 1942 in Amerika erfunden wurde, sowohl militärischen als auch friedlichen Zwecken eher zur Verfügung
- dieses Harz ist für Tragwerke am besten geeignet aufgrund des günstigsten Preis/Leistungsverhältnisses
- bereits seit Mitte der 40er Jahre arbeiteten Forschungsgruppen baubezogen (Dietz am M.I.T.)

Es ist also nicht verwunderlich, dass erste Realisierungsmöglichkeiten von Tragwerken aus FVK nicht in den kriegsbeschädigten Ländern Europas gegeben waren. Obgleich diese Länder einen ebenso großen Erfahrungsschatz mit dem Bau von Flugzeugen in Leichtbauweise hatten, waren ihnen politisch und wirtschaftlich zwischen 1945 und 1950 die Hände gebunden. In Einzelfällen blieben die Europäer jedoch nur minimal hinter den Amerikanern zurück.

Bereits 1946 stellte man auf der Ausstellung „Berlin plant“ neben konventionellen Gebäuden auch erste Kunststoffbauten vor, die die schnelle Beseitigung des Wohnungsmangels lindern sollten *Ludwig (1998)*, 117. Von wirklichen Häusern konnte man hier noch nicht sprechen, es waren eher Wohncontainer oder Raumzellen. Bis zum Bau von echten Behausungen, die Kunststoffe raumabschließend verwendeten, vergingen noch einige Jahre, und zwar in Amerika wie in Europa. Das französische Schneckenhaus von Ionel Schein und Y. Magnant, 1956 als Modell auf dem Salon der Haushaltkünste in Paris vorgestellt (Abb. 11) *Schein (1959)*, 236, folgte seinem amerikanischen Vorbild, dem Monsanto House of the Future, welches 1954 mit einer Idee begann und 1957 präsentiert werden konnte *Dietz (1957a)*. Beide Häuser sind auf Initiativen der Chemieindustrie zurückzuführen. Parallele und beinahe zeitgleiche Entwicklungen in den USA und Europa zeigen sich auch bei den sogenannten Forscher-Ingenieuren, die die Entwicklung maßgeblich beeinflussen und die abseits der Bestrebungen der Chemieindustrie ihre Tragwerke aus FVK entwickeln. In den USA verwendete Buckminster Fuller 1954 glasfaserverstärkten Kunststoff für einen Radom, in Europa gebührt Heinz Isler das Verdienst der Realisierung des ersten Tragwerkes aus GFK 1956. Er stellt Kugelkalotten aus FVK in Eigenproduktion her und verwendete diese als Oberlichter für seine Beton-Buckelschalen.



Abb. 11
französisches Schneckenhaus, Haushaltmesse, 1956, Paris
Gang-Plastik-Haus (1957)

Nachdem in den USA die Anwendung von FVK für Tragwerke nach dem kommerziellen Misserfolg des Monsanto House schnell zum Erliegen kam *Saechtling (1973)*, holte man in Europa auf und fand im Laufe der Dekade 1960 bis 1970 besonders im individuellen Wohnungsbau genügend Betätigungsfelder. Als Quintessenz dieser Bemühungen kann die internationale Kunststoffhaus-Ausstellung in Lüdenscheid 1971 gelten (Abb. 12) *Schwabe (1971b)*. Auf einem 70.000 m² großen Gelände waren 12 verschiedene Häuser ausgestellt *IKA '71 (1972)*. Man fand ernst zu nehmende Versuche, die Eigenschaften der FVK für mobile, transportable Ferienbehausungen zu nutzen. Dazu zählen die auch im Anhang beschriebenen Einraumgebäude Futuro, Rondo und Bulle Six Coque, allesamt Ferienhäuser mit rund 50 m² Grundrissfläche. Auch die Möglichkeit der Herstellung von einzelligen Minimalkonstruktionen und deren beliebige Fügung zu mehrzelligen Häusern wurde an vielen Projekten demonstriert. So verbergen sich hinter den Namen DO, Algeco oder Diamant Raumzellen der Größenordnung 2×2×2 m, die die modulare Bauweise bedienen. Solche Raumzellen sind die am häufigsten hergestellten Tragwerke aus FVK, wie im Kapitel Tragwerke anhand der tabellarischen Übersicht festzustellen ist. Noch experimenteller als die Einzeller waren Versuche, mit Schaumstoffen allein Raumstrukturen zu errichten, indem man Skelettrahmen mit selbst-erhärtenden Hartschäumen ausfüllte. Sowohl vom Architekturbüro 3h-design Hübner und Huster als auch von Heinz Isler wurden solche Projekte vorgestellt. Sie werden in dieser Arbeit nicht untersucht, da es sich nicht um Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen handelt.

Das 1971 begonnene Ausstellungs-Experiment wurde 1972 fortgesetzt, indem weitere Häuser auf dem Gelände präsentiert wurden. Die Lüdenscheider Ausstellung ist auf eine private Initiative der SABAG (Sauerländischen Baugesellschaft) und deren Geschäftsführer H.W. Schmöle zurückzuführen, der von den Möglichkeiten und der Vielfalt der neuen Behausungen angetan war *Doernach (1972)*. Die ausgestellten Häuser sollten nicht nur zu besichtigen sein, sondern auch zu kaufen. Geplant war eine Bestückung des Ausstellungsgeländes fortlaufend, mindestens jedoch für 5 Jahre. Nach 3jähriger Standzeit waren die Häuser jedoch aufgrund mangelnder Pflege und ungenügender Sorgfalt der Abdichtungs-Maßnahmen bei der Aufstellung in derart desolatem Zustand, dass an einen Verkauf nicht zu denken war. Hasso Ziegler schrieb einen vernichtenden Artikel in der deutschen Presse *Ziegler (17.12.1974)* und machte klar, dass nun der Traum vom „Haus aus Kunststoff – dem Traumhaus von morgen“, wie *Saechtling (1957)* so schön formulierte, wohl ausgeträumt sei und man sich wieder auf „gutes, altes Holz“ als Baumaterial besinnen sollte.



Abb. 12
Überblick über das Ausstellungsgelände der IKA '71 in Lüdenscheid,
im Vordergrund das Bulle Six Coque, in zweiter Reihe links das Futuro,
rechts das Rondo, in dritter Reihe links der Biodom aus Schaumkunst-
stoffen
Schwabe (1971)

2.1 Die Bauherren

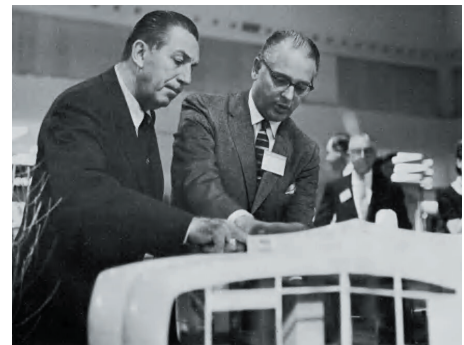
Woran lag es, dass der Traum so schnell ausgeträumt war? Lag es an den Bauherren, hatten sie nicht die Macht oder waren sie zu halbherzig, die neuen Bauweisen durchzusetzen? Zu allen Zeiten gab es Herrscher, die infolge der Konzentration von Macht und Geld in der Lage waren, großartige Bauwerke errichten zu lassen. Berühmte Tragwerke wie die Kuppeln des alten Rom oder die Gewölbe gotischer Kirchen entstanden allein durch die Kombination dieser beiden Eigenschaften. *Schlaich/Heinle (1996)* machen in ihrem Buch über Kuppeln deutlich, dass man zum Bau eines solchen Tragwerkes vor allem eines braucht: einen Bauherren, der mächtig genug und finanzkräftig ist, seine Vorstellungen durchzusetzen. Eine Kuppel muss man wollen.

So ähnlich verhält es sich auch mit den Tragwerken aus FVK, in erster Linie braucht es den richtigen Bauherren. Im Hinblick auf die Durchführung eines solchen Bauvorhabens sollte ihm folgendes beschieden sein: Experimentierfreude, Verhandlungsgeschick, ein eigener und über andere Meinungen erhabener Geschmack, finanzielle Unabhängigkeit und nicht zuletzt Ausdauer und Energie, der so genannte „lange Atem“. Wer aber konnte diese Eigenschaften überhaupt mitbringen?

In erster Linie verbirgt sich hinter diesen Anforderungen ein privater Bauherr, eine Privatperson oder ein privat geführtes Industrieunternehmen. Der Staat als Bauherr scheint zunächst nicht geeignet. Und doch sind viele innovative Tragwerke aus FVK mit einem staatlichen Bauherren entstanden, wie später noch zu sehen sein wird.

Abb. 13

Durch gute Kontakte des Monsanto-Vizepräsidenten R.K. Mueller zu Walt Disney (links) (beide am Modell) konnte das Monsanto House of the Future im Disneypark stationiert werden. *Monsanto (1968)*



Beim Bauen steht zu Beginn eine Bauaufgabe, deren Lösung durch den Bauherren in Gemeinschaft mit den Architekten, Ingenieuren und anderen Beteiligten herbeigeführt wird. Erst während dieser Lösungsfindung wird das geeignete Material festgelegt. Auch die Verwendung von FVK ergab sich größtenteils erst durch die Bauaufgabe. Ausgenommen davon waren die Bestrebungen der chemischen Industrie, ihre Produkte für einen neuen Markt zu testen. In diesen Fällen gehen alle Überlegungen von einem Werkstoff aus, für den eine Bauaufgabe gefunden wurde.

Private Bauherren

1. Chemieindustrie:

In den USA kommen zu Beginn der Entwicklung wesentliche Impulse von der Kunststoffindustrie. Die Firma Monsanto lässt in 5jähriger Forschungsarbeit von einem großem Team ein Wohnhaus entwickeln. Das Monsanto House wird jedoch aus vielerlei Gründen kein Erfolg. In Europa wird das französische Schneckenhaus als Beispiel für die vielfältigen Möglichkeiten des Bauens mit Kunststoffen präsentiert. Es wurde von der Zeitschrift „Elle“ *Dufflos (1961)*, 782 finanziert. Die unter der Rubrik Raumzellen und Boxen zusammengefassten Tragwerke sind fast ausnahmslos auf Initiativen der Chemieindustrie zurückzuführen *IBK (1973)*. Konnten diese neue Bauweisen das Bauen verändern? Im Falle des Monsanto House muss man die Frage bejahen. Hier wurde ein völlig neues Raumkonzept, ein offenes Wohnen propagiert, welches eine neuartige Tragkonstruktion zur Folge hatte. Die jederzeit demontierbaren Flügel waren nur in Leichtbaukonstruktion denkbar. Gegenüber einem Metallleichtbau hatte aber der Leichtbau mit FVK den Vorteil der idealeren Oberflächen und zudem der freieren Formbarkeit. Das Monsanto prägte viele andere Entwürfe bezüglich des freien Raumkonzeptes, so die mobilen Behausungen Rondo, Futuro und Bulle Six Coque.

2. andere Industrien – größere Investitionsvolumen

Unter den privaten Bauherren finden sich Investoren, die dem Bau eines Tragwerkes aus faserverstärkten Kunststoffen nicht abgeneigt waren. Diese Bauherren hatten vorderst den Wunsch nach einem Gebäudetyp, sie verbanden diesen aber nicht mit dem Wunsch nach Kunststoffen in der Tragstruktur. Hier waren es die Architekten, die den Werkstoff als geeignet für die Bauaufgabe herausfilterten. Als erstes Beispiel lässt sich die Zusammenarbeit zwischen Sir Henry Ford und Richard Buckminster Fuller anführen. Für die Überkuppelung der Fordwerke in Dearborn schlug Fuller eine zweilagige geodätische Kuppel mit Aluminiumstäben und Glasfaserkunststoff-Platten vom Durchmesser 28,3 m vor *Meikle (1995)*. Weder war der Werkstoff für diese tragende Aufgabe jemals getestet noch genormt worden. In Henry Ford fand Fuller den geeigneten Bauherrn für solch eine mutige Aufgabe, hier zeigt sich erstmals diese Verschmelzung von Macht und Geld, von Neugierde und auch den langem Atem brauchte es, „weil das ursprünglich vorgesehene Polyester-Fiberglas nicht in der erforderlichen Qualität lieferbar war.“ *Krausse (1999), 359*

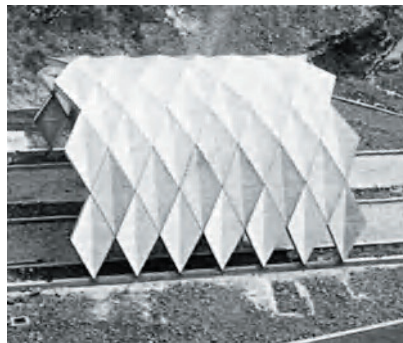


Abb. 14 (links)
mobiles Tankstellensystem
aus gleichen Schalenteilen
von Matti Suuronen für
GULF *Fomekk (2004)*

Abb. 15
Schwefelgewinnungsanlage
in Pomezia von Renzo Piano
aus gleichen Faltelementen
Makowski (6/1969)

Ein anderes Beispiel eines geeigneten Bauherrn finden wir in den Werkseignern der Schwefelgewinnungsanlage in Pomezia (Abb. 15). Ein Bauherr, der den Intentionen und auch der Neugier des Architekten folgt. Renzo Piano sagt darüber in seinem „Logbuch“:

„Die Anlage hatte eine tunnelähnliche Struktur; mit fortschreitendem Schwefelabbau wurde der hintere Teil des Tunnels nach vorne geschoben. Ermöglichte dies nicht allein die Modulbauweise, sondern auch die Leichtigkeit und das begrenzte Ausmaß der einzelnen Elemente, was die manuelle Demontage und den Wiederaufbau gestattete. Das Beispiel zeigt zwei verschiedene Dinge: Wir schenken sowohl der Eleganz des Details Aufmerksamkeit als auch den industriellen Kosten; und wir taten dies mit jener etwas frechen Neugier, die uns auch heute noch veranlasst, traditionelle Lösungen umzukehren und die Karten neu zu mischen.“ *Piano (1997), 24*

Freie Hand ließen auch die folgenden Bauherren ihren Architekten und Entwicklern. Heinz Isler überdachte 1960 die Tankstelle in Thun mit einer eigens hergestellten fugenlosen Kassettenplatte 14,50×20 m aus Glasfaserkunststoffen (Abb. 77, 78) und fertigte nach dem gleichen Prinzip 1965 die rollbaren Oberlichter 12×13 m für das Rheinkraftwerk in Säckingen (TODT 4.3.1.1-1965/01) *Isler (1975)*. Der Mineralölkonzern GULF vertraute 1972 auf Matti Suuronen und lies aus einer einzigen doppelt gekrümmten Schalenform ein Tankstellenprinzip entwickeln, welches mehrfach in Finnland anzutreffen ist (Abb. 14) *Voigt/Genzel/Suuronen/Siponen (02.06.2004)*.



Abb. 16 (links) Kuhstall in Quebec (Kanada) nach dem geodätischen Prinzip mit Platten aus GFK *The Estate of R. Buckminster Fuller*

Abb. 17 Wohnhaus fg 2000 in Altenstadt *Feierbach (1970)*

3. Private Bauherren – kleinere Investitionsvolumen

Bei kleineren Investitionsvorhaben sind Architekten anzutreffen, die mit Kunststoffen weniger Erfahrung hatten. Im Gegensatz zu großen Ausstellungs- oder Repräsentationsbauten, wo vornehmlich der Staat der Auftraggeber war, hatten die Mehrzahl der Häuser aus FVK in der Tragstruktur private Bauherren. Meistens sind Bauherr, Architekt und Nutzer sogar eine Person, wie beispielsweise beim Wohnhaus fg 2000 von Wolfgang Feierbach (Abb. 17). Infolge dieser Tatsache unterlagen Herstellung, Konstruktion und Fügung keinem Diktat und keiner regelnden Institution. Durch die privaten Bauherren ergibt sich erstmals die Möglichkeit, derart gewagte Bauten zu errichten. Als Beispiele lassen sich hier anführen:

- 1954 der Kuhstall in Quebec (Kanada), errichtet nach dem geodätischen Prinzip von Buckminster Fuller (Abb. 16) *Tomorrow's Barn (1955)*
- 1968 das Bulle Six Coque, erdacht zwischen 1964 und 1966 von Jean Maneval unter eigener Anfertigung von Studien zur Marktfähigkeit, Suche nach finanzieller Unterstützung und technischer Realisierbarkeit (TOdT 4.3.2.6-1967/02) *Guillot (1970)*
- 1968 das Futuro, entwickelt von Matti Suuronen und Yrjö Ronnka als Skihütte für einen Freund des Architekten (Abb. 60) *Voigt/Genzel/Suuronen/Siponen (02.06.2004)*.
- 1969 das Rondo, entwickelt von den Architekten Casoni & Casoni auf Anfrage einer Immobilienfirma, der Bellavista Monte Generoso (TOdT 4.3.2.6-1969/01) *Der Wohnberg (1968)*

Staatliche Bauherren

In vielen Fällen hatte ein staatlicher Bauherr ein Tragwerk aus Kunststoffen zu verantworten. Da der Werkstoff prädestiniert ist für leichte transportable Überdachungen, wie sie für Ausstellungsbauten nötig sind, kann er dort auch seine freie Formbarkeit am besten zur Geltung bringen. Ausstellungsbauten sind von jeher größtenteils staatlich finanziert. Die staatlichen Bauherren waren in ihren Entscheidungen maßgeblich durch Architekten beeinflusst.



Abb. 18 (links) Ausstellungsüberdachung von Roberto Menghi *Quarmby (1974)*

Abb. 19 Ausstellungsüberdachung von Heinz Hossdorf für die Expo '64 in Lausanne *Hossdorf (2003)*

Ausstellungsbauten

1957 entwirft Roberto Menghi eine Überdachung für die Mailänder Triennale (Abb. 18) *Les Matieres Plastiques (1959)*. Es ist die erste nachweisbare Hyparschalenkonstruktion aus faserverstärkten Kunststoffen überhaupt, ein Prototyp für viele folgende. Eine atemberaubende Konstruktion entwirft Heinz Hossdorf 1964 für die Schweizer Landesausstellung Expo '64 in Lausanne (Abb. 19). Seine weitspannenden Hyparschalen werden aus Gründen der Material- und Kostenersparnis vorgespannt, was damals ein gewagtes Experiment war. Hossdorf lobt die Bauherren, die dieses Wagnis mitgetragen haben: „auch die Abklärung aller technischen Fragen hätte nicht genügt, um das Vorhaben zu einem erfolgreichen Ende zu führen, wäre nicht die Verantwortung für das Wagnis von allen Beteiligten, den Architekten, den Unternehmern, vor allem aber der Direktion der Expo in einem Klima der vertrauensvollen Zusammenarbeit voll mitgetragen worden.“ *Hossdorf (2003), 58* Große Experimentierlust zeigten auch A. G. H. Dietz und die Ausstellungsmacher für die amerikanische Ausstellung im Sokolniki-Park in Moskau (TOdT 4.3.2.4-1959/01), Renzo Piano mit seinem italienischen Ausstellungspavillon für die Expo 1970 in Osaka (Abb. 31), Georg Lippsmeier und Stefan Polónyi mit den Pavillons für die deutsche Industrieausstellung 1971 in Brasilien (Abb. 33) und nicht zuletzt auch Buckminster Fuller mit seinem Expo-Dom 1967

in Montreal. Ohne das gemeinsame Mittragen von Ideen durch die Bauherren wären diese großartigen Kunststoffbauten nie realisierbar gewesen.

Schulbauten

Bei den Schulbauten waren es vor allem Eigenschaften wie Leichtigkeit und die damit verbundene Möglichkeit, den Schulbau oder die geplante Erweiterung selbst machen zu können, die die Elternschaft überzeugten. Die Schirmtragwerke der Elementary School in den USA (TOdT 4.3.2.4-1959/02) *Gigliotti u.a. (1961)* oder der Grundschule in London (TOdT 4.3.2.4-1970/01) *Zerning (1975)* sind Beispiele hierfür. Bei der Frobisher Bay School 1971 im nördlichen Kanada standen das elementierte Bauen und die Möglichkeit der Vorfertigung für die Bauherren im Vordergrund (Abb. 20) *Saechtling (1973)*, 524.

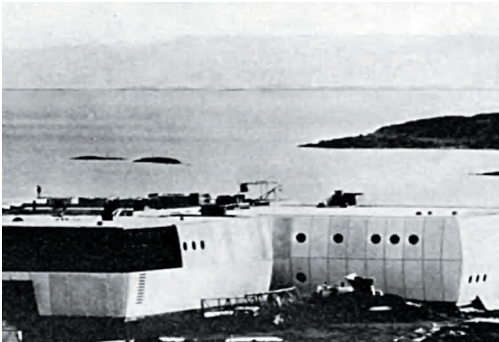


Abb. 20
Schulbau unter klimatisch extremen Bedingungen:
Frobisher Bay in Kanada *Saechtling (1973)*, 524

Dome-Bauten

Einen ganz anderen Aspekt nutzten die Erbauer der Radome nach dem geodätischen Prinzip Buckminster Fullers. Radome werden als schützende Hülle für Radare des Militärs oder als Sende-, Wetter- oder Forschungsstation genutzt (TOdT 4.2.1.4). „Die Radome bestehen hauptsächlich aus GFK, da jede Einhausung dieser Art im wesentlichen nicht-metallisch sein muss, sonst würde die elektromagnetische Strahlung gestört werden. Da der Schwenkbereich der Antenne im Grundriss ein Kreis ist, bildet sich ein sphärischer Dom, eine Schale. Die Kugel stellt zudem das maximalste Volumen bei geringstem Materialverbrauch bereit. Sie ist aus einem Muster von dreieckigen, fünfeckigen, sechseckigen oder anderen („geodätisch“) Elementen zusammengesetzt [*Dietz (1970)*]. Bis heute sind sie als Bauwerk optimal in Konstruktion, Form und Material auf ihre Nutzung abgestimmt.“ *Genzel/Voigt (2005)*, 27.



Abb. 21
Radom von R. Buckminster Fuller
www.radome.net

Zusammenfassung:

Von Seiten der Chemieindustrie gingen weit weniger Investitionen aus, als nötig gewesen wären. Es gab mehr private Investoren aus chemiefernen Gebieten. In den meisten aufgeführten Fällen hatten die Bauherren eine große Neugier und vertrauten den Architekten trotz der Tatsache, dass es keine Normen und selten Richtwerte gab. Warum konnten sie dies tun? Es ist mit der allgemeinen Befindlichkeit dieser Zeit zu erklären. Nach der Beseitigung der Kriegsschäden war man Neuem gegenüber wesentlich aufgeschlossener als zu anderen Zeiten. Bei den größeren Bauvorhaben, beispielsweise den großen Ausstellungsbauten brauchten die Bauherren allerdings schon im Umgang mit den FVK erfahrene Architekten, die wussten, worauf sie sich einließen. Den Mangel an Normen glichen sie durch eine experimentelle Nachweisführung aus. Es waren aber nicht nur die Architekten, die durch das Interesse an neuen Konstruktions- und Wohnformen die Entwicklung voranbrachten. Im nächsten Abschnitt stehen die Personen im Vordergrund, die an der Einführung von Tragwerken aus FVK beteiligt waren.

2.2 Die Beteiligten

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich nicht allein auf die Ingenieure, welche die Tragwerke aus FVK entwickelten, bemäßen und vor allem testeten. Die Frage steht globaler: Wer war an dem Prozess der Verwendung von FVK für Tragwerke beteiligt. Welchen Umständen und vor allem, welchen Personen verdanken wir die Einführung des Werkstoffes. Ohne die Architekten und Institute zu nennen, wäre die Arbeit unvollständig.

Im betrachteten Zeitraum von 1950 bis 1980 hatten die Berufsstände Architekt und Bauingenieur bereits deutliche Abgrenzungen erfahren. Architekten als entwerfende Künstler, Bauingenieure als dienende Rechner - lässt sich dies heute allgegenwärtige Bild auch für das Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur zeichnen? Oder waren andere Personen nötig, um die Tragwerke mit dem neuen Werkstoff zu entwerfen, aber auch zu bauen und damit standsicher auszuführen?

Ingenieure

Entwurfsverfassende Ingenieure

Zu Beginn finden sich einige Persönlichkeiten, die die Abgrenzung zwischen den beiden Disziplinen nicht verinnerlicht haben, man könnte sie als „Ingenieur-Architekten“ bezeichnen. Durch ihren Forscherdrang gelingt es ihnen, erste Tragwerke aus FVK zu realisieren. Sie sind Entwerfer, Konstrukteure, Modellbauer, Bemessende und oft sogar Bauherren und Bauausführende in einer Person.

Richard Buckminster Fuller (USA)

Fuller ist für den ersten Bau mit FVK in der Tragstruktur verantwortlich *Meikle (1995)*. Mit seiner als Patent durchgesetzten Einteilung von Kuppeln in eine geodätische Struktur ist Fuller in erster Linie Konstrukteur. Er arbeitete im Laufe seines Lebens mit allen Materialien. Dass Fuller glasfaserverstärktes Polyesterharz für seine Kuppeln verwendete, hatte zwei Gründe. Erstens passte dieser Werkstoff hervorragend zu den räumlichen Strukturen seiner Raumtragwerkelemente, so auch für die Überkuppelung der Ford-Rotunde in Dearborn, die er mit Platten aus Glasfiber tragend abdecken wollte. „Schon damals tendierte Fuller aber eher zu räumlichen, d.h. allseitig sich entwickelnden Strukturen. In Dearborn war wohl die Absicht entscheidend gewesen, eine durchgehende Haut aus Kunststoff zu bilden, wofür sich die ebenen Facetten des Oktet-Gitters gut eigneten.“ *Krause (1999)*, 359. Zweitens lässt sich Fullers Liebe zu dem leichten transparenten Material schon vor seiner Verwendung für Tragwerke belegen „Plastic was neither ‚artificial‘ nor ‚synthetic‘. Instead it was ‚inherently natural‘ because it was based on discovery of ‚complex structural behaviours permitted by nature‘. Plastic indicated not an improvement on nature but a more efficient human adaption to nature’s ‚rules of structuring.‘“ *Meikle (1995)*, 215.

Nachdem die Überkuppelung der Ford-Rotunda mit Glasfiberplatten nicht gelang, konnte er im selben Jahr 1954 ein Radom auf dem Mt. Washington komplett aus tragenden Kunststoffen herstellen *Dietz (1955)*, 90. Entscheidend dazu beigetragen hatte die am Lincoln Laboratorium bereits 1954 begonnene erfolgreiche Weiterentwicklung der geodätischen Kuppeln zu einem metallfreien Kuppeltyp für Radarstationen.



Abb. 22
Buckminster Fuller mit einer seiner Fly Eys Strukturen
The Estate of R. Buckminster Fuller

Fullers Herangehensweise an die Realisierung einer Struktur war experimentell. Im kleinen Maßstab probierte er aus, wie sich die Einzelteile zum Ganzen zusammenfügen. Anhand größerer Modelle erhielt er auch Auskunft über die prinzipielle Tragfähigkeit seiner Strukturen. Diese ihm eigene Arbeitsweise, die er durch die Arbeit mit seinen Studenten intensivieren konnte, ist die typische Arbeitsweise aller „Ingenieur-Architekten“, die FVK tragend einsetzten.

In seiner Arbeit mit Studenten ist Fuller gegenüber den anderen „Ingenieur-Architekten“ einzigartig. Kein anderer nutzt dieses Forum derart als Ideenquelle.

„Unmittelbar nach den geometrischen Entdeckungen im Frühjahr 1948 [...] nimmt Fuller eine Lehrtätigkeit am Institute of Design in Chicago an und wird zum Sommerkurs an das Black Mountain College eingeladen. Nahtlos geht seine Forschungstätigkeit in eine Modellierungsarbeit mit Studenten über. Es beginnt eine beispiellos intensive Unterrichtstätigkeit an einer wachsenden Zahl von Kunst- und Design-Schulen, Universitäten und Colleges. Fuller hat die Gabe, die Studenten zu begeistern und sie zu echten Innovationen und Erfindungen zu stimulieren. Ohne die Beiträge der zahlreichen Studenten und Mitarbeiter, wäre Fullers Erfolg mit den geodätischen und tensegren Strukturen in den fünfziger Jahren kaum denkbar.“ *Krausse (1999), 314*

Fuller war nicht in der Lage, seine geodätischen Kuppeln aus faserverstärkten Kunststoffen selbst zu bemessen. Er war ein Konstrukteur und kein Statiker. Die Berechnungen wurden von seinen Mitarbeitern erstellt.

Einfluss:

Fuller übt einen beachtlichen Einfluss auf andere Ingenieure aus und trägt maßgeblich zur Verbreitung von FVK in der Tragstruktur bei. Drei Dinge sind dafür entscheidend. Erstens: Er ist eine schillernde Persönlichkeit und zu dem Zeitpunkt, als er mit FVK arbeitet, bereits durch die geodätischen Kuppeln unter Künstlern, Architekten und Ingenieuren bekannt und beachtet. Zweitens: Seine Forschungsarbeiten führt er mit einer Reihe von Studenten durch, und die gegenseitigen Inspirationen führen zu den großen Entdeckungen. Drittens: Seine Verwendung des FVK für Radome geodätischer Teilung erweist sich als überaus glücklich, da kein anderes Material den Anforderungen dieses Bautypes derart gerecht würde. Die Radome werden in großer Zahl weltweit gefertigt. Diese Anwendung des neuen Werkstoffes für eine Massenproduktion trägt wesentlich zu seiner Akzeptanz unter den Architekten, Ingenieuren und Bauherren bei.

Heinz Isler (CH)

In Europa war Isler der erste, welcher Schalen aus FVK herstellte und verwendete. Er ist der einzige Vertreter, der in gleichem Maße den Schalenbau aus Beton als auch aus faserverstärkten Kunststoffen praktizierte.

Seine Arbeitsweise ist eindeutig experimentell, alle tragenden Strukturen werden von ihm mit einer Reihe von Modellen erarbeitet. Dies gilt sowohl für seine Arbeiten mit Beton als auch mit FVK. Beginnend mit einem kleinen Maßstab werden die Modelle nach und nach untersucht und getestet, um ihre Form immer besser an die aufgebrachten Lasten anzupassen. Die „Methode Isler“ unterscheidet sich also nicht grundlegend von den Methoden der anderen „Ingenieur-Architekten“; in der Formulierung der Ziele unterscheidet sie sich wohl. Im Gegensatz zu anderen Schalenbauern verwarf Isler geometrisch beschreibbare Schalen als „schlechte Schalen“ und wandte sich natürlichen Formen zu.

„Viele der vor 1960 gewählten Formen gehörten eher zu der weniger guten Kategorie: Sie waren fast ausschließlich geometrisch definiert, also Teile von Zylindern, Kegeln, Kugeln. Sie waren leicht zu beschreiben und zum Teil analytisch zu berechnen. Aber sie waren weit entfernt von den Formen die statisch ideal sind. Meine beiden aus den zwei Beobachtungen abgeleiteten Formkategorien aber trafen voll ins Schwarze.“ *Isler (2002), 12*

1954 entdeckt Isler an einem aufgeschüttelten Kopfkissen die ideale (Seifenhaut-) schale über rechteckigem Grundriss, 1955 macht er die Entdeckung der hängenden Membran, für ihn sichtbar an einem gefrorenen Tuch auf der Baustelle *Isler (2002), 9*. Sein Arbeitsziel waren Formen, die die direkte Antwort auf die wirkende Kräfte sind. Das Ziel war erreicht, wenn innerhalb der gebildeten Form nur Membrankräfte entstanden, möglichst gleichmäßig über die Fläche verteilt. Mitunter korrigierte Isler zum Zwecke des günstigeren Lastabtrages die Freiformen. Beispielsweise ändert er seine Kissenformen über rechteckigem Grundriss (Abb. 25) in den Ecken so, dass die Tangente an die Schale hier wesentlich steiler verläuft bezogen auf die Grundrisskante. Die Einleitung der Stützkräfte am Rand wird somit wesentlich günstiger bzw. mit einer entsprechend dünnen Schale überhaupt erst möglich.

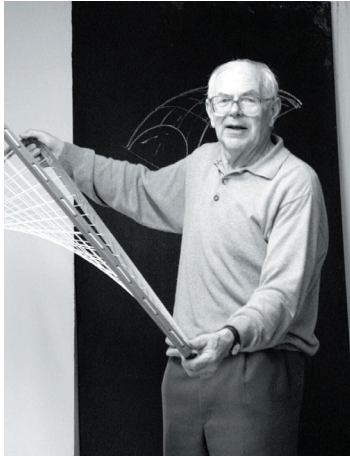


Abb. 23
Heinz Isler
Fomecke (2003)

Eine solche Entwurfsmethode war nur möglich durch ein eigenes Versuchslabor, welches Isler seit 1955 besaß.

Islers Schalenbauten in Beton gehen denen aus FVK zeitlich voraus. 1956 entstehen in kurzer Folge drei Schalentragswerke aus glasfaserverstärktem Polyester, die Oberlichter, die Klimakammern für die Schweizer Armee und die Überdachung einer Kläranlage *Isler (1975)*. Trotz der Zeit seines Lebens unbegrenzten Suche nach idealen Schalenformen verwendet Isler für Schalen aus FVK weiterhin geometrisch beschreibbare Flächen. Hierzu zählen alle Oberlichtkuppeln (TOdT 4.3.2.2-1956/01), das Dutler-Röhrenhaus (TOdT 4.3.2.1-1969/02) und die Kletterskulptur für den Künstler A. Duarte (TOdT 4.3.2.3-1974). Freie Formen hingegen sind die Schalen für die Klimakammern der Schweizer Armee (TOdT 4.3.2.5-1956), die Vordächer und Passerellen mit angesetzter Dachrinne (TOdT 4.3.2.5-1985), das Projekt für den 30 m Dom (TOdT 4.3.2.5-1969) und die Markthallenschirme (TOdT 4.3.2.4-1968/01) *Isler (1975)*. Der Ausstellungspavillon für Claude S.A. (TOdT 4.3.2.2-1969/02) ist die formgetreue Nachbildung der Betonschale des Wyss Gartencenters in Solothurn von 1962. Isler nutzte eine Translationsform *Billington (2003), 136*.

Isler stellte auch ebene Flächentragswerke aus FVK her, dazu zählen alle Sandwichkonstruktionen nach eigenem Herstellungsprinzip. In zeitlicher Folge sind dies die Dachplatte für ein Wochenendhaus (1959), die Überdachung der Tankstelle Thun (1960), rollbare Dachfenster des Rheinkraftwerkes Säckingen (1965), das Oberlicht der Kirche Fellbach (1965) und die gefaltete Überdachung eines Pausenschulhofes in Geisslingen (1967) (alle TOdT 4.3.1.1) *Isler (1975)*. Er hatte auch hier die gleiche Arbeitsweise wie bei den Schalen: Formfindung über das Experiment. Bei seinem ersten Plattentragswerk für ein Wochenendhaus entsprach das Modell dem endgültigen Tragswerk.

Islers Arbeitsweise der Formfindung über Modelle oder den 1:1 Versuch ist dem Entwerfen von Tragswerken aus FVK sehr angemessen. Sie trägt sowohl der freien Formbarkeit zu 100% Rechnung als auch der Möglichkeit, den Werkstoff durch Veränderung der Zusammensetzung, beispielsweise des Fasermaterials oder der Lagenanzahl, den Beanspruchungen anzupassen. Sie kann aber prinzipiell nicht ohne weiteres von anderen Ingenieuren nachvollzogen werden, da ein eigenes Labor Grundbedingung für dieses Arbeiten ist sowie die Bereitschaft, die Realisierung von Tragswerken mit eigenen Mitteln zu gewährleisten.

Islers Anwendungsphase von Tragswerken aus FVK ist gemessen an anderen Konstrukteuren ungewöhnlich lang. Zwischen 1956 und 1985 findet Isler immer wieder Verwendungsmöglichkeiten für den FVK in Tragswerken. Trotz seiner experimentellen Entwurfsmethode ist er ein Ingenieur, der genaueste Kenntnisse von Statik und Festigkeitslehre besitzt. Seine statischen Berechnungen sind von großer Genauigkeit *Isler (1970)*.

Einfluss:

Trotz seines beispiellosen Umgangs mit dem Material und dessen Verwendung für Membranschalen, trotz seiner großen Vielfalt und der langwährenden Zeitspanne der Anwendung von tragenden Kunststoffen, übt Isler kaum Einfluss auf die Entwicklung von Tragswerken aus FVK aus. Zwar wird Isler von vielen Ingenieuren, besonders den Mitgliedern der Internationalen Schalenvereinigung (IASS) vor allem wegen seiner Betonschalen gekannt und geachtet, was sich durch zahlreiche geladene Vorträge äußert *Polónyi (1970), Isler (1975), Isler (2003)*. Das Geheimnis des Tragverhaltens seiner Bauten lüftete er jedoch nie ganz. Seine Herstellungstechnik beschreibt er nur so weit, dass sie nicht ohne weiteres nachgeahmt werden kann. So bleibt er nahezu unangreifbar und in gewissem Sinne auch allein.

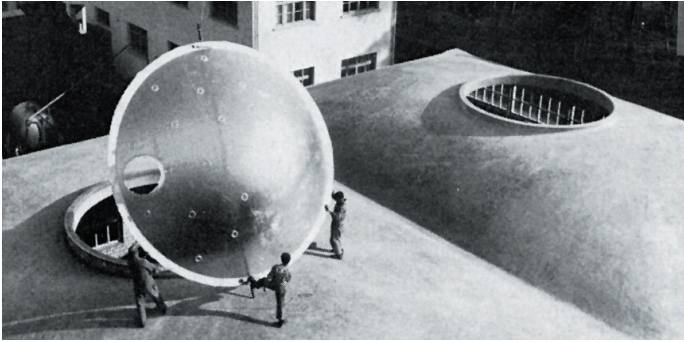


Abb. 24 (links)
Oberlichter aus GFK verwendete Heinz Isler für seine Betonbuckelschalen bereits 1956



Abb. 25
Überdachung von Heinz Isler von 1985 als Schalenfreiform *Fomekk* (2002)

Heinz Hossdorf (CH)

Ein anderer Schweizer Ingenieur, der ein bedeutendes Tragwerk aus faserverstärkten Kunststoffen realisierte, ist Heinz Hossdorf. Er arbeitete zwar nur ein einziges mal mit Glasfaserpolyester in der Tragstruktur, sein Umgang mit dem Material und seine Detaillierung sind jedoch exzellent. Hossdorf, der eigentlich Raumfahrttechnik studieren wollte und seine Denkweise selbst als die eines Physikers bezeichnet *Genzel / Hossdorf* (14.06.2005), besaß ebenso wie Heinz Isler seit 1955 ein Modellbaulaboratorium in Basel, in welchem er seine ungewöhnlichen Tragwerke testen konnte. Als Modellbaumaterial verwendete er Polyester in verstärkter und unverstärkter Form. Sowohl die Tatsache, dass er mit dem Material bereits Erfahrungen gesammelt hatte als auch sein Standort in der Schweiz, einem Land, das neuen Entwicklungen durchaus offen gegenüberstand, halfen ihm, die Überdachung für die Expo '64 in Lausanne zu realisieren *Genzel / Hossdorf* (14.06.2005). Die Überdachung ist eine Schirmkonstruktion mit 18 m Spannweite. Die aus Hyparflächen zusammengesetzten, 3 mm dünnen Polyesterschalen sind auf einem Metallrahmen verklebt. Die Schirmschalen dienen nicht als Ausfachung, sondern GFK und Stahl bilden gemeinsam das Tragwerk. Möglich wurde dies durch einen Schirmmechanismus, der die Konstruktion vorspannt, so dass in allen Belastungskombinationen das Tragwerk zugbeansprucht bleibt. Das Potential der hohen Zugfestigkeiten des FVK weiß Hossdorf sowohl zu nutzen als auch zu bewältigen. Das Arbeiten mit diesem Material bezeichnet er selbst als das größte Abenteuer seines Lebens *Genzel / Hossdorf* (17.05.2004). Das Projekt ist ausführlich im Anhang beschrieben.

Einfluss:

Hossdorf zeigte als erster, welches Potenzial das Material tatsächlich besitzt, wenn man es in einer Tragstruktur als Zuelement einsetzt. Sein sparsamer Umgang mit dem Material ist beispiellos. Er stellt alle Vorzüge heraus: Lichtdurchlässigkeit (auch nachts), Leichtigkeit, Mobilität, freie Formbarkeit. In der Fachwelt fand die Expo '64 in Lausanne eine breite Resonanz *Hossdorf* (1962), (1966). Seine Schirmkonstruktion regt sowohl die Industrie als auch die Architekten und Ingenieure zum Umgang mit dem Material an.



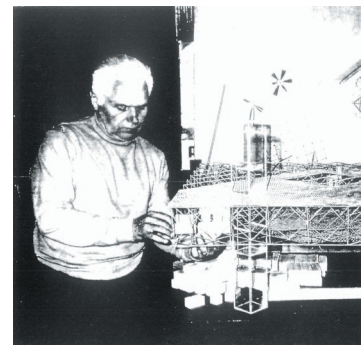
Abb. 26
Heinz Hossdorf *Hossdorf* (2003)

Stephane Du Château (F)

Stephane Du Château gehört zu den Wegbereitern der Entwickler leichter Raumkonstruktionen wie Konrad Wachsmann, Richard Buckminster Fuller, Robert Le Ricolais, Max Meringhausen und Zygmunt Stanislaw Makowski. Neben Fuller und Makowski ist er der Dritte, der erst mit räumlichen Systemen experimentiert und aus dieser Beschäftigung heraus den faserverstärkten Kunststoff als geeignetes Material für die Umsetzung leichter, weitspannender Tragwerke entdeckt. Im Gegensatz zu seinen Wegbereitern materialisiert er jedoch die räumlichen, dreidimensionalen Strukturen auf Basis von platonischen Körpern niemals mit faserverstärkten Kunststoffen, sondern nur in Metall *Du Château (1967)*. Er entwickelt zahlreiche konstruktive „Systeme“, die er patentieren lässt und von denen das erste, „Tridirectionnelle-S.D.C.“ (1957), bei der Überdachung des Kraftwerks an der Talsperre Grandval/Puy-de-Dôme Anwendung findet (1957/58; Architekt: Henri Marty) www.archinform.de. Die Veröffentlichung über diesen Bau gelangt auch in die Hände von Makowski, der die Bedeutung des SDC damals bereits erkennt und sich dadurch zu eigenen Forschungen an dreidimensionalen Raumsystemen inspirieren ließ www.zachaz.com und www.unb.br. Später untersucht Makowski und seine Mitarbeiter diese Strukturen eingehend am Institut of Surrey in London und erstellt geeignete Theorien zu deren Berechnung. Diese nützen wiederum Du Château, der seine stählernen Raumstabwerke am Institut of Surrey berechnen lässt *Du Château (1967)*, 29.

Du Château wird zu einer Leitfigur für diese Bauweise. Auf der Basis der Gesetze von den Polyedern und seiner eigenen Erkenntnisse zur Baustoffkunde setzt Du Château seine Fähigkeiten als ausgebildeter Bauingenieur und Architekt „konsequent für die Vervollkommnung von Raumkonstruktionen ein und arbeitet hauptsächlich an deren modularer Geometrie, der Konfiguration vorgefertigter Elemente (Stäbe und Knoten), ihrer Standardisierung, der Verbindungstechnik (u.a. Schweißen und Verschrauben) und der Umsetzung in die Praxis“ www.archinform.de.

Abb. 27
Stephane Du Château
www.unbr.br



Du Châteaus Arbeiten mit FVK sind durch die Suche nach industriellen Lösungen und modularen Bauweisen gekennzeichnet. Er entwirft drei Markthallen großer Spannweite, die allesamt aus gleichen radial angeordneten, doppelt gekrümmten Schalen gebildet sind (Abb. 28 bis 30). Sie werden auf einem Stahlrohrgerüst gelagert. Hier zeigt sich, dass Du Châteaus Denkweise in räumlichen Strukturen, die aus Metallstäben und Flächenelementen zusammengesetzt werden, den Entwurf seiner Tragwerke aus FVK behindert. Die stählerne Unterstützung der Radialschalen ist statisch verzichtbar. Der Versuch der ausführenden Firma Dubigeon-Normandie, die Halle St. Ouen 1968 mit 18 m Durchmesser ohne die „überflüssige“ Stahlrohrkonstruktion herzustellen, gelingt *Du Château (1972)*, 56. Hingegen ist seine Überdachung der Tribüne des städtischen Stadion Laval 1965-69 eine beispielhafte Anwendung von tragenden Bauteilen aus FVK in Kombination mit Stahlrohren in einer weitgespannten Konstruktion (Abb. 121,122). Du Château entwirft gemeinsam mit dem Architekten Jean-Saint Arroman ein auskragendes Dach, welches die industriell gefertigten und verfügbaren Polycorolles-Körper (hyperbolische Paraboloidenelemente mit 7×4 m Abmessung) des Architekten Yves Chaperot nutzt. Er erreicht damit eine Spannweite von 28 m.

Einfluss:

Du Châteaus strukturelle Untersuchungen in den 50er Jahren sind von großem Einfluss auf seine Wegbereiter, darunter Makowski. Innerhalb Frankreichs wird er ein vielbeachteter Ingenieur. Mit faserverstärkten Kunststoffen beginnt er erst 1965 zu arbeiten.

Das Zusammenfügen von kleinen vorgefertigten Elementen zu einem Tragwerk großer Spannweite, also das modulare Bauen als Prinzip wendet Du Château ebenso wie Makowski, Piano oder Buckminster Fuller auch für Tragwerke mit ver-

stärkten Kunststoffen an. Du Château erarbeitet nur Vorschläge, in denen die Module aus GFK zusammen mit Elementen aus Stahl ein Tragwerk ergeben. Dies ist eine für Tragwerke mit FVK ideale Konstruktionsmöglichkeit. Die Leistungsfähigkeit kleiner GFK-Module demonstriert Du Château am Stadion Laval, bei seinen gekrümmten Schalenformen für die Markthallen erweist sich das Zusammenspiel der Materialien Stahl und FVK als überflüssig.



Abb. 28, 29 und 30
vorgefertigte doppelt gekrümmte Kuppelschalen aus GFK von Stephane Du Château *Du Château* (1972), 56
v.l.n.r.: Museum zum Gedenken an die Landung der Alliierten in Sainte-Mère-Eglise (1967), Markt in Argenteuil und in de Fontenay aux Roses (1967), Markthalle St. Ouen bei Paris (1968, nur die letzte Halle wurde ohne Stahlrohrgerüst ausgeführt)

Renzo Piano (I)

Der Architekt Renzo Piano ist Forscher, Suchender und Experimentierer. Er hat mit allen Materialien gearbeitet und ist in allen Konstruktionsformen zu Hause. Sein suchendes Beginnen jedoch war auf engste Weise mit dem Kunststoff verknüpft. Dies hatte hauptsächlich zwei Gründe: 1. Von Beginn seiner Laufbahn an war Piano an Herstellungsmethoden interessiert, die die Möglichkeit der Vorfertigung boten. Strukturen aus FVK sind dazu, wie Piano alsbald erkannte, sehr geeignet. 2. Ebenso faszinierte Piano als Architektur-Absolvent der „absolute Raum ohne Formkorsett“ *Piano* (1997), 22. Auf der Suche nach leichten, eleganten Strukturen führte sein Weg ans Battersea College in London, wo er Raumstrukturen bei Z.S. Makowski studierte. Sowohl seine Herangehensweise an die strukturellen Probleme, als auch deren Lösung und materielle Verwirklichung, unterschied sich von denen anderer Mitarbeiter am Institut Makowskis (Robak, Gilkie, Benjamin, siehe Z.S. Makowski). Piano lies sich von den Pyramidenstrukturen, die Makowski bereits 1961 in London aus Aluminium realisierte, inspirieren, entschied sich aber gleichzeitig, seine theoretischen Erkenntnisse durch praktische Erfahrungen zu ergänzen. 1964 gründete er mit seinen Kollegen (R. Foni, G. Garbuglia, N. Tirelli und M. Filocca) ein Institut, das sich mit der Anwendung von FVK befasste *Makowski* (2/1969), 10. Noch im selben Jahr realisierte er die erste Konstruktion aus faser-verstärkten Kunststoffen. Die räumlichen Strukturen aus GFK, aufgestellt in Genua (1964/65) (TODT 4.3.1.3-1965/03) sind somit seine ersten Schritte als praktizierender Architekt *Compagno* (1991), 48. Sie wurden, wie auch die noch folgenden, durch die Baufirma seines Bruders verwirklicht. Renzo Piano wuchs in der Familie eines Bauunternehmers auf, war also von Kindheit an mit der praktischen Umsetzung von Ideen vertraut. Sowohl diese Tatsache, als auch die Weiterführung der Bauunternehmung durch den Bruder, mit dem er herzlich verbunden ist, kann hier als entscheidende Tatsache dafür gelten, dass Piano eine Reihe ungewöhnlicher Ideen für Bauten mit Tragwerken aus FVK in die Tat umsetzen konnte. Über Pianos Arbeitsweise sagt *Compagno* (1991), 43 „seine Arbeit ist besonders durch eine charakteristische Haltung geprägt: den Versuch die spezifischen Eigenschaften jedes Materials durch eine sinnvolle Anwendung, sowohl in der Tragkonstruktion, als auch im Detail aufzuwerten.“

Dies äußert sich in zweierlei Hinsicht.

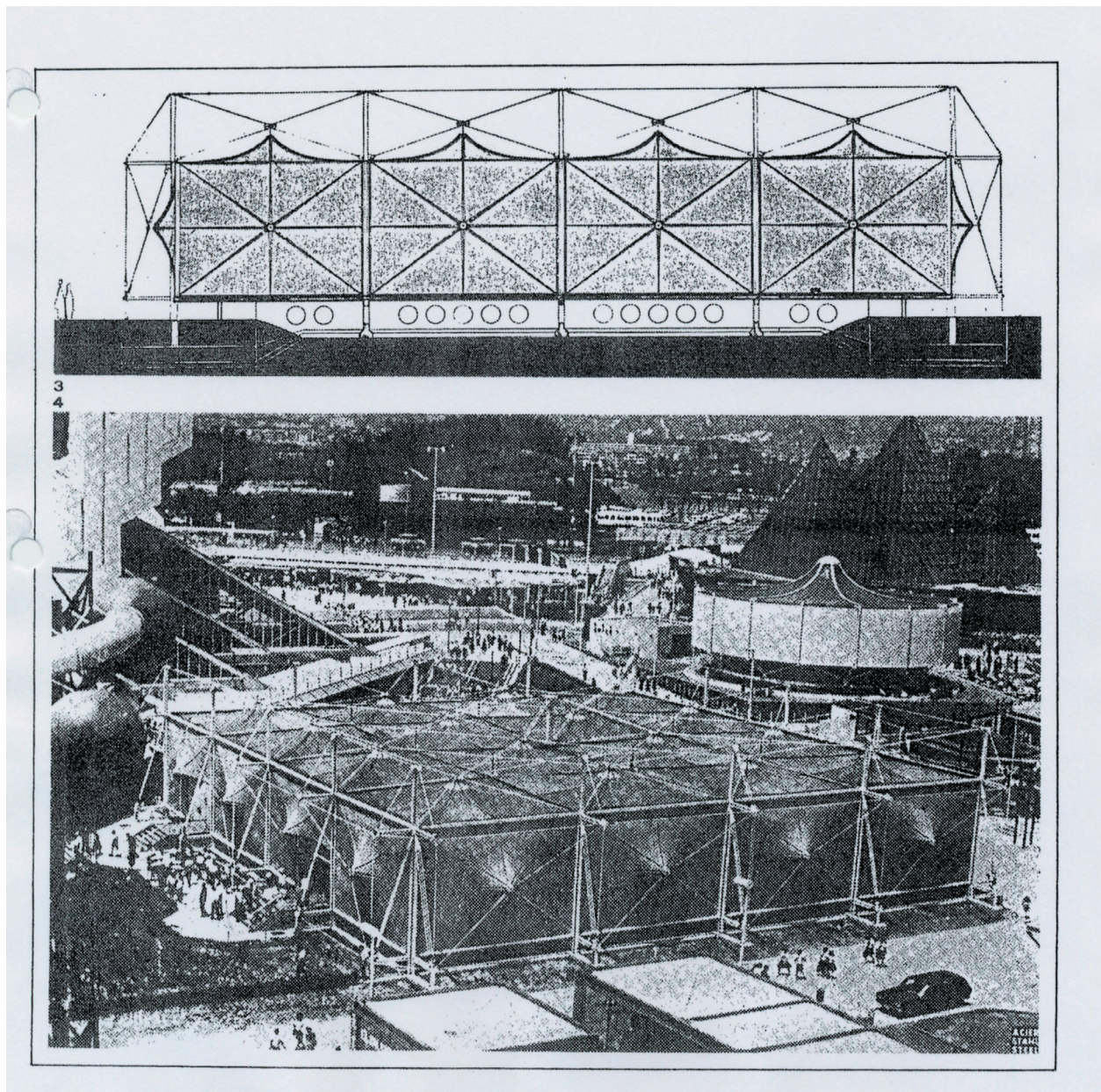
1. In Pianos Strukturen werden FVK neben der Tragfunktion immer auch eine Reihe anderer Funktionen, vornehmlich Schutz-Funktionen zugewiesen: Raumabschluss, Wetterschutz, und infolge seiner transparenten Herstellbarkeit auch die natürliche Beleuchtung. Auch mit anderen Materialien behält Piano diese Herangehensweise später bei (Menil Collection in Houston-Texas).
2. Er nutzt die herausragende Eigenschaft des FVK, seine hohe Zugfestigkeit, nutzen, weil er den komplizierten Anschlussmechanismus solcher zugbeanspruchten Konstruktionen beherrscht. Zwei Beispiele zugbeanspruchter Tragwerke aus FVK werden im Kapitel 4.3.3 beschrieben. Das erste ist die gespannte Struktur aus Stahl und glasfaserverstärktem Polyester in Genua (1966), (Abb. 127-130). Das zweite ist der Pavillon der Italienischen Industrie auf der Expo in Osaka (1969-70) (Abb. 31) *Compagno* (1991), 60 und 66.

Einfluss:

Neben Heinz Hossdorf erkennt und beherrscht Piano als einziger der früh wirkenden Pioniere des Kunststoffbaus, also der Pioniere der 60er Jahre, das Potenzial des Werkstoffes. Er setzt ihn als Zuelement ein. Später in den 80er Jahren wird auch in der DDR dieses Tragprinzip noch einmal Anwendung finden *Ackermann (2001)*. Wesentlich sind Pianos Einflüsse innerhalb der Gruppe um Z.S. Makowski. Seine Bautätigkeit regt seine Mitstreiter zur Realisierung der eigenen Strukturen an *Makowski (2/1969)*.

Abb. 31

Pavillon der italienischen Industrie für die Expo in Osaka von Renzo Piano, 1969/70 *Compagno (1991), 82*



Stefan Polónyi (D)



Abb. 32
Stefan Polónyi www.tu-berlin.de

1965 beruft die Architekturfakultät der TU Berlin Stefan Polónyi zum Professor für Tragwerkslehre. Das Institut für Modellstatik untersteht ihm ebenso. Er lehrt dort bis 1973. In den 8 Jahren seiner Zeit an der TU Berlin beschäftigt sich Polónyi auch mit Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen. Unter seiner Führung entstehen eine Reihe Forschungsarbeiten, so z.B. die Dissertation „Tragfähigkeitsprobleme ausgeschäumter GFK-Hohlprofile bei Kurzzeitbelastung“, die der Autor Carsten Langlie 1971 einreicht. Langlie beginnt damit eine Laufbahn als Experte für Tragwerke aus FVK. 1973 wird er gebeten, die statische Berechnung und die zugehörigen Versuche für das Bausystem fg 2000 von Wolfgang Feierbach zu erbringen. Polónyi äußert sich meist zu weitgespannten Tragwerken aus FVK, insbesondere zu Schalen und Falten Polónyi (1968), (1969), (1979), (1973). Seine beiden eigenen synklastischen Schalenkonstruktionen (Pavillon für die deutsche Industrieausstellung in Brasilien 1971 (Abb. 33) und Pavillon für die Reichold-Albert-Chemie in Düsseldorf aus dem Jahre 1973) sind geprägt durch sparsamen Umgang mit dem Material und ideale Vorfertigungstechniken.

Nach seinem Weggang von Berlin wendet sich Polónyi anderen Materialien für seine Tragwerke zu.

Einfluss:

Polónyi übt im deutschen Sprachraum einen nennenswerten Einfluss aus. Seine Publikationen zur Bemessung von tragenden Kunststoffen sind ebenso einfach wie verständlich aufgebaut Polónyi (12/1968), (14/1969), (1/1973) und daher den Ingenieuren seiner Zeit hilfreich, weil man genormte Bemessungsregeln noch vermisst. Über seinen Schüler Langlie wird sein Einfluss im deutschen Raum noch vergrößert. Auch gelingt es Polónyi, die Industrie, namentlich Bayer für die Forschungen an seinem Institut zu interessieren und finanziell zu beteiligen. Seine herausragenden Leistungen auf dem Gebiet der Tragwerksplanung mit anderen Materialien Polónyi (2003) stellen jedoch seine realisierten Tragwerke aus FVK in den Schatten, tragen aber wesentlich zu deren Bekanntheit bei.

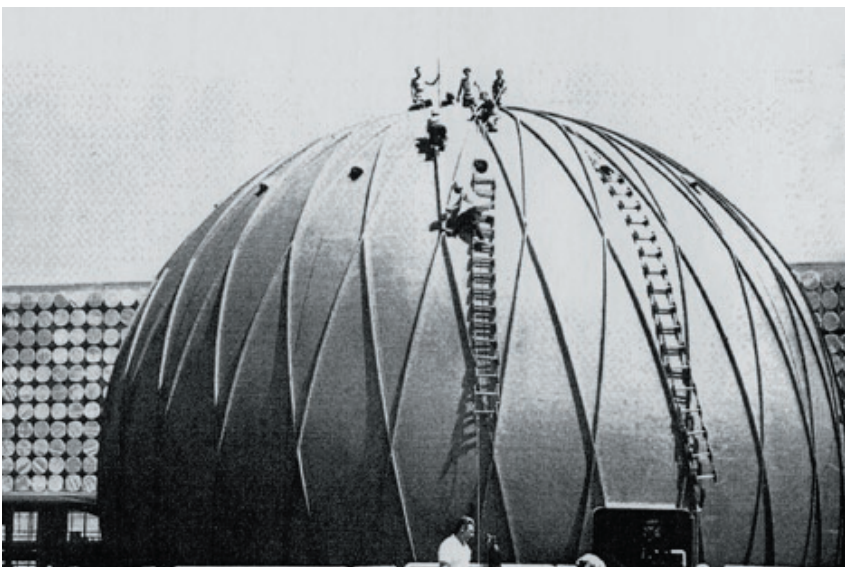


Abb. 33
Kugelpavillon für die deutsche Industrieausstellung in Brasilien von Stefan Polónyi und Georg Lippsmeier, das Tragwerk ist eine Rippenschale Polónyi (2003)

Yves Magnant (F) und die französische Kunststoffarchitektur

Außer von den Ingenieurarchitekten Buckminster Fuller und Isler gingen die frühesten Entwicklungen für Kunststoffhäuser von französischen Architekten aus. Die Geschichte des Kunststoffhauses beginnt mit den Arbeiten von René Coulon, Yves Magnant und Ionel Schein im Jahre 1955/56 (Abb. 34) *Monnier (2002)*.

Das französische Schneckenhaus (1956) (Abb. 11) ist das erste Produkt einer fruchtbaren Zusammenarbeit von Menschen unterschiedlichster Profession, die sich in einem effizienten Netzwerk zusammengeschlossen hatten, um das gesellschaftlich geprägte Bild vom Wohnen zu revolutionieren. Auch wenn man für die 1960er Jahre solche Zusammenkünfte in Gruppen mit dem Ziel der Neuordnung oder Neuorientierung per se anzutreffen hofft, so ist in Europa nur für die Länder Frankreich und Großbritannien eine solche produktive Gruppenarbeit nachweisbar. Während in Deutschland die Trennung der Professionen Architekt und Bauingenieur schon damals weit verbreitet war, schlossen sich in Frankreich die zu dieser Zeit führenden Entwickler für Kunststoffkonstruktionen Coulon, Magnant und Schein in der Gruppe CEBUMS (Centre d'étude du bâtiment pour l'utilisation des matières de synthèse) in Boulogne-Billancourt zusammen *Ganz-Plastik-Haus (1957)*, 57. Später erweiterte man die Zusammenarbeit auf Künstler, Wissenschaftler und ebenso Vertreter aus benachbarten europäischen Ländern, wie Frei Otto aus Deutschland und Arthur Quarmby aus Großbritannien. 1965 ging daraus die „Groupe International d'Architecture Prospective“ (GIAP) hervor.

Geprägt durch das globale Interesse der Gruppenmitglieder an der Veränderung der Wohnformen, ist die Arbeit der Ingenieure in diesem Kontext denn auch geprägt durch unkonventionelles Denken und Mut zum Experiment. Ingenieure wie Yves Magnant waren beteiligt an der Realisierung ungewöhnlicher Bauten wie dem Bulle Six Coque von Jean Maneval (T'OdT 4.3.2.6-1967/02), der Canéac-Zelle (T'OdT 4.3.2.6-1964) oder dem club de jeunes S.E.R.A. (T'OdT 4.3.26-1967/03). In allen Fällen trugen sie zur Realisierung der meist als Prototyp erstellten Bauten durch Überlegungen bei, die den Grad der Vorbemessung nicht überschritten. Sie verließen sich auf Tests am Prototyp selbst *Bancillon (24.05.2004)*, (2003).

Im eigenen Lande behaupteten sich die visionären Vorstellungen der Kunststoffarchitekten neben der Architektur des Modernismus und des Massenwohnungsbaus während der „Architectures de la croissance“ (1960-1973) und wurde von der normalen Bevölkerung angenommen *Monnier (2002)*.

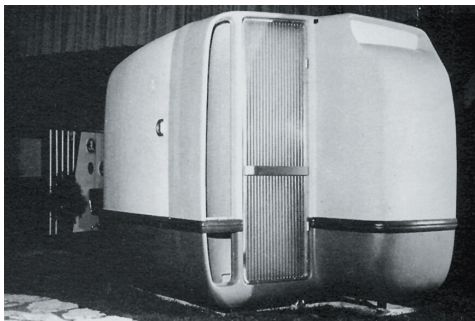


Abb. 34
Coulon-Schein-Kabine, 1956
Quarmby (1974), 48

G. Dieterich machte die erste überschlägliche Bemessung für das Feierbach'sche Wohnhaus wahrscheinlich 1967 *Dieterich (ca. 1967)*. Er war zu dieser Zeit wenig erfahren in der Bewertung von Tragwerken aus Glasfaserkunststoffen, viele Annahmen in seiner Berechnung sind geschätzt. 1969 vergibt das Bundesministerium für Bauwesen und Forschung einen Forschungsauftrag für das Bausystem fg 2000. Man beginnt sofort mit der dezidierten statischen Beurteilung des Bausystems, der eine Reihe von Versuchen zur Seite gestellt werden. Die Forschungsgruppe setzte sich nunmehr aus den Ingenieuren Gerhard Dieterich, Georg Menges, A. Caemmerer und Amtor Schwabe zusammen. Carsten Langlie vom Ingenieurbüro für Bauwesen AIV in Berlin wird ebenso gebeten, eine statische Berechnung zu erstellen und Versuche durchzuführen. 1973 erfolgt dann die Prüfung der statischen Berechnung und der zahlreichen Versuche durch G. Dieterich im Auftrag des Institut für Bautechnik. Im selben Jahr wird das System fg 2000 zugelassen.

Dieterich und Langlie haben abwechselnd statische Berechnungen vorgelegt und geprüft, die in großen Teilen identisch sind (Abb. 35, 36). Dieses Wechselspiel zwischen Ingenieur und Prüfindgenieur war der Tatsache geschuldet, dass es kaum ausgewiesene Tragwerksplaner für FVK gab und dass sich diese beiden Ingenieure mit ihren praktizierenden Büros im Hintergrund in die Arbeit teilen mussten. Langlie hatte durch seinen Anschluss an das Institut für Bautechnik und seine experimentellen Erfahrungen an der Technischen Universität Berlin unter Polónyi letztlich die Rolle des Statikers und Leiters der Versuche übernommen, während Dieterich die endgültige Prüfung übernahm.

Während in Frankreich auf den theoretischen Nachweis der Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen verzichtet wurde und sich Ingenieure, Designer und Architekten gemeinsam am Entwurf beteiligten, ist in Deutschland die Aufgabenteilung zwischen Ingenieur und Architekt deutlich spürbarer als anderswo. Die Formfindung und das Experiment kann in den meisten Fällen den Architekten zugeschrieben werden *Doernach (1974)*, *Feierbach (5/1973)*, während sich die Ingenieure intensiv um den theoretischen Nachweis bemühten. Dieser intensiven Bemühung ist allerdings zu verdanken, dass gerade in Deutschland eine Reihe von Bemessungsalgorithmen für Tragwerke aus FVK entstanden, die bis heute ihre Gültigkeit behielten. In zeitlicher Nähe zu den Arbeiten am fg 2000 sowie in den darauffolgenden Jahren gibt Langlie einige Empfehlungen zur Bemessung von Tragwerken aus verstärkten Kunststoffen *Langlie (1973)*, *(1978)*, *(1983)*, *(1986)*, die für die Fachwelt von größtem Interesse gewesen sein dürften. Sie werden im Kapitel Bemessung und im Anhang genauer vorgestellt.

Abb. 35 und 36

(links): die erste statische Berechnung für das Bausystem fg 2000, erstellt von G. Dieterich, 1967 *Dieterich (ca. 1967)*

(rechts): eine differenzierte Berechnung erstellt C. Langlie 1973, sie wurde von G. Dieterich geprüft und führte zur Zulassung des Systems fg 2000 *Langlie (1973)*

Institute

Wesentliche Impulse für den Einsatz von FVK in einer tragenden Struktur gingen von staatlichen Instituten aus. Hier ist eine deutliche Trennung zu verzeichnen zwischen den Instituten, die sich der Erprobung des tragenden Werkstoffes durch Versuche und realisierte Projekte näherten (Plastic Research Laboratory am Massachusetts Institut of Technology, Plastic Institut London) und denjenigen, die ihn theoretisch erforschten. Ersteren gebührt das Verdienst der Erstellung von nutzbaren Bauten (Monsanto House) sowie der Erfindung von neuen Konstruktionen (Raumstrukturen mit Pyramiden aus GFK von Z.S. Makowski). Trotz ihrer Praxisbezogenheit hatten einige dieser Institute großen Anteil an der Bereitstellung von Konstruktionsunterlagen für tragende Bauteile aus Kunststoffen *Saechtling (1973), 484*.

Einen bedeutenderen Anteil an der Bereitstellung von Dimensionierungsvorschriften hatten aber die theoretisch und in der Grundlagenforschung arbeitenden Institute. Es handelt sich sowohl um Institute der Luft- und Raumfahrt (Institut für Luft- und Raumfahrt IfL in Dresden, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart), die bereits während oder kurz nach dem 2. Weltkrieg mit den Forschungen begannen, als auch um Institute an den Bauingenieur Fakultäten der Universitäten. Bedeutende theoretische Forschungsergebnisse wurden in Deutschland gemacht, und zwar sowohl in der Bundesrepublik als auch in der DDR. In einem zusammenfassenden Artikel über den Stand der Dimensionierungsgrundlagen für tragende Bauteile aus Kunststoffen bemerkt Makowski in *Saechtling (1972), 484* entsprechend:

„In der Bundesrepublik werden werkstoffmechanische Grundlagen für das Konstruieren mit Kunststoffen und die Dimensionierung von Kunststoffbauteilen durch laufende Forschungsarbeiten an einer ganzen Reihe von Instituten geschaffen.“ Makowski nennt das Institut für Kunststoffverarbeitung der Rheinisch-westfälischen Technischen Hochschule Aachen, namentlich G. Menges und R. Taprogge, die Zahlenwerte für die Berechnung der meisten konstruktiv verwendbaren Kunststoffe zur Verfügung stellen. Im Deutschen Kunststoff-Institut Darmstadt haben sich vor allem A. Puck und H. Würtinger mit dem Festigkeitsverhalten glasfaserverstärkter Kunststoff-Bauteile befasst. Die Planungsgruppe Forschung der Arbeitsgemeinschaft verstärkte Kunststoffe e.V. (AVK) versucht, diese und weitere Forschungsarbeiten zu koordinieren.

Die theoretisch arbeitenden Institute haben zum großen Teil ihre Arbeit erst Anfang der 1960er Jahre begonnen und lieferten Ergebnisse erst gegen Ende dieses Jahrzehnts.

Entwurfsverfassende Institute

Plastic Research Laboratory am Massachusetts Institut of Technology (M.I.T.) Albert G. H. Dietz

Das Plastic Research Laboratory am Massachusetts Institut of Technology (M.I.T.) entstand in direktem Zusammenhang mit den Arbeiten zum Monsanto House of the Future. Nach Entwurf und öffentlicher Präsentation des Hauses arbeitete zwischen 1955 und 1957 eine unabhängige Gruppe, bestehend aus Architekten (Hamilton und Goody), Ingenieuren des M.I.T. (Dietz, McGarry, Heger), Designern (V.G. Canzani) und Vertretern der Industrie an der Realisierung des Kunststoffhauses. Wichtigste Person innerhalb des Forschungslaboratorium am M.I.T. war Albert G. H. Dietz. Seit 1934 wirkte er als Assistent am Department of Building Engineering and Construction und wird 1954 zum Professor des Institutes Civil Engineering and Architecture ernannt *Sonneborn (1954)*. Die Arbeit mit Kunststoffen als Tragstruktur begann für ihn durch den Kontakt zur Industrie. Infolge dieser Zusammenarbeit entstanden neben dem Plastic Research Laboratory auch diverse kleinere Forschungsgruppen für Sandwichkonstruktionen, Kunststoffe und Zusatzstoffe *Dietz (2/1955), 87*.

Die Arbeitsweise von Dietz war die eines großen Organisators. An den 5 Jahre währenden Forschungen zum Monsanto House waren 16 Mitarbeiter beteiligt, davon 13 Bauingenieure. Verständlicherweise kam Dietz die Rolle zu, Tendenzen und Richtungen vorzugeben, obgleich festzustellen ist, dass seine Kompetenzen nicht über die der Architekten hinausreichten. Das Monsanto House of the Future besitzt kein dem Material FVK angemessenes Tragwerk, die Form des Hauses, aus der sich das Tragwerk zwangsläufig ergibt, ist der architektonischen Idee geschuldet. Über kaum ein anderes Bauwerk ist indes soviel Ingenieurwissen angesammelt worden wie über das Monsanto House. In einem finalen Bericht liegen sämtliche Erkenntnisse zum Tragwerk und dessen Entwicklungsstufen vor *Dietz, Final Report (1957a)*. Das Wissen wurde aber lediglich für



Abb. 37
Albert G.H. Dietz *Dietz* (2/1955)

zwei weitere Bauwerke angewendet, die Schirme für die amerikanische Ausstellung im Sokolniki-Park in Moskau (TOd'T 4.3.2.4-1959/01) und eine Volksschule (TOd'T 4.3.2.4-1959/02). Dabei hätten die gemachten Erfahrungen einer Reihe von Ingenieuren als Bemessungshilfsmittel dienen können. Beispielsweise wurden eine Reihe Testserien gefahren, um das geeignete Material in der Zusammensetzung aus Harz und Fasern zu bestimmen *Dietz, Final Report* (1957a). Auch die Tests der Bolzenverbindungen geben Aufschluss über deren Verwendungsmöglichkeiten in anderen Konstruktionen. Außer zweier Artikel in der amerikanischen Zeitschrift „Modern Plastics“ über das Monsanto House *Dietz* (06/1957), *Dietz* (07/1957) wurden jedoch die Forschungsergebnisse nicht veröffentlicht, standen also weder in Amerika noch in Europa zur Verfügung. Sowohl seine frühen Artikel *Dietz* (1955), als auch spätere Buchveröffentlichungen *Dietz* (1969) versuchen die Anwendung von FVK für Tragstrukturen zwar vergnüglich lesbar, aber sehr allgemein darzustellen. Die Fachwelt registrierte indes seine Kompetenz für tragende Kunststoffe und lud ihn zur *World Conference on Shell Structure* (1962) nach San Francisco.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklungen in den USA, ausgehend von der chemischen Industrie, äußerst anregend waren für die Forscher, Architekten und Ingenieure in Europa; für die USA erwies sich die Kunststoffforschung am M.I.T. leider als Selbstzweck.

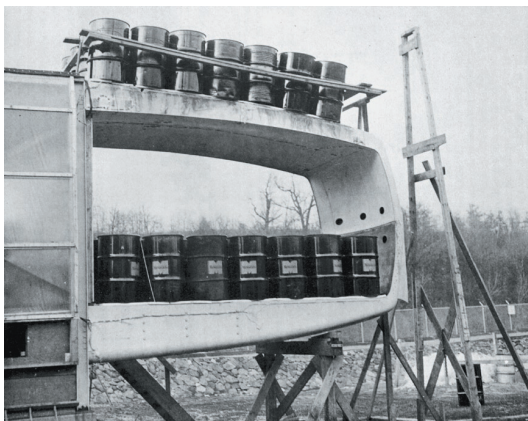
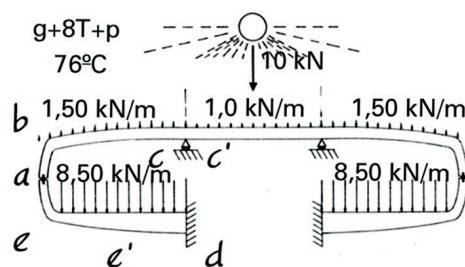
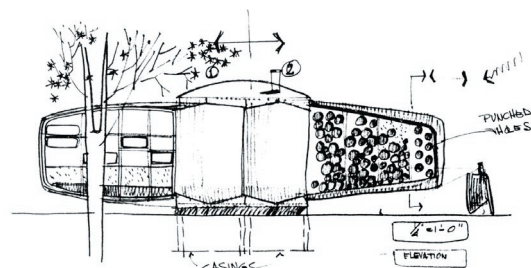


Abb. 38 (oben links) und Abb. 39 (oben rechts)
architektonischer Entwurf und Lastansatz für das Monsanto House *Dietz* (1957a)
Abb. 40 (unten links)
Belastungen am Probeflügel
Dietz (1957a)

Battersea College of Technology, später University of Surrey, London
Zygmunt Stanislaw Makowski

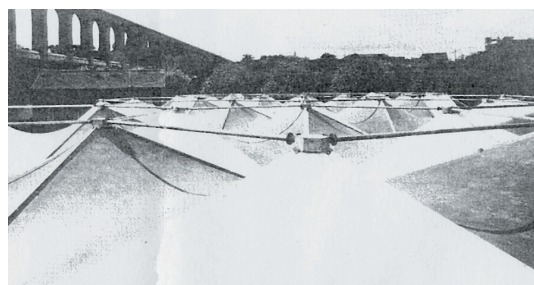
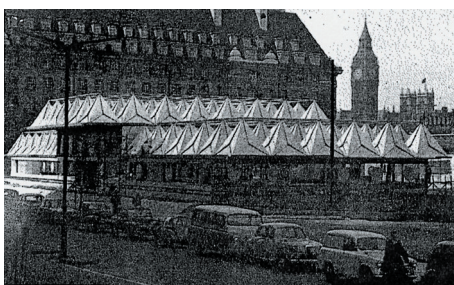


Abb. 41a-41d v.l.n.r.
 Zygmunt Stanislaw Makowski und seine Mitarbeiter R. C. Gilkie, D. Robak und B. S. Benjamin
World Conference (1962)

„Im letzten Jahrzehnt wurde ernsthaft versucht, befriedigende Konstruktionsunterlagen für tragende Bauteile aus Kunststoffen zu entwickeln. Das 1964 von *Plastics Institute, London*, ins Leben gerufene *Plastics Design Engineering Subcommittee* hat mit Rat und Tat einschlägige Arbeiten sehr gefördert. [...] Im Jahre 1963 gründete die *Structural Division der Amerikan Society of Civil Engineers* einen technischen Ausschuß zur Verwaltung der Arbeiten von 4 Forschungsgruppen. Der Ausschuss hatte die Aufgabe, ‚Forschungsziele zu setzen und zu fördern, sowie theoretische und praktische Ergebnisse über die bautechnische Eignung von verstärkten und unverstärkten Kunststoffen zu beurteilen und zu koordinieren‘. Dieser Ausschuß veranstaltete im April 1969 in Louisville Kentucky, USA, ein Symposium über ‚Die Eigenschaften und Möglichkeiten von Kunststoffen für tragende Bauteile. [...] Das Plastic Institute in England organisierte eine Tagung über ‚Kunststoffe in tragenden Bauteilen‘. Beiträge aus dieser Tagung wurden in [*Plastics in building Structures (1966)*] veröffentlicht, darunter einige sehr bedeutende über die Konstruktion von Bauteilen. Auch auf Tagungen der Institution of Structural Engineers ist das Thema behandelt worden [*Gilkie, Robak (1966)*].“ *Z.S. Makowski in Saechtling (1973)*, 484.

Die sehr bedeutenden Veröffentlichungen, von denen hier die Rede ist, sind die Forschungsarbeiten zu Raumstrukturen mit Pyramiden aus verstärkten Kunststoffen, die unter Leitung von Makowski am Battersea College of Technology, später University of Surrey, London, durch ihn und seine Mitarbeiter R.C. Gilkie und D. Robak durchgeführt wurden. Auch Renzo Piano war an diesen Forschungen beteiligt. Das Verdienst der gesamten Forschungsgruppe äußert sich in der Formulierung ausführlicher Rechenverfahren für Faltwerke, mit denen auf handhabbare Weise die Spannungsverteilung bestimmt werden kann. Alle theoretischen Entwicklungen wurden durch Versuche an Prototypen untermauert *Saechtling (1973)*, 488. Die untersuchten Strukturen waren jede Art von Faltwerken, die sich aus Elementen aus FVK zusammensetzen ließen. Es wurden zwei Ansätze verfolgt:

1. Die Bildung von Strukturen allein aus FVK-Elemente.
2. Die Bildung von Strukturen aus räumlichen Stabstrukturen unter Ergänzung von Faltflächen aus FVK.



Makowski begann seine strukturellen Untersuchungen an Raumstabwerken auf Inspiration von Stephane Du Château zeitgleich mit dessen Veröffentlichung über das SDC-System 1957 www.zachaz.com. Während Du Château nur doppelt gekrümmte Schalentragwerke und nicht seine Baukastensysteme mit FVK realisiert, erarbeitet Makowski diese modularen Baukastensysteme sowohl in Aluminium als auch in FVK. Die beiden Materialien Metall und GFK in der Verwendung für die Pyramiden der Raumstrukturen rangieren bei Makowski gleichberechtigt und auch etwa zeitgleich (Abb. 42, 43).

Die Arbeiten an Pyramiden aus GFK beginnt Makowski 1958 *Makowski (7/1968)*, 11. Zusammengesetzte Strukturen aus FVK und Metallen testet Makowski seit 1959 *Les Matières Plastiques (1959)*, 113 und *Makowski (6/1969)*, 224. Er erhält den Auftrag für eine

Überdachung in Texas und führt ein Tonnengewölbe aus (TOdT 4.3.2.3-1959). Es handelt sich um ein Netz von Aluminiumstäben unter Zufügung von hyperbolischen Paraboloiden aus GFK, welches von William R. Orr entworfen wurde *Davies (1962), 107*. Ein realisiertes Projekt aus Aluminium ist beispielsweise das Gebäude der Tagungsleitung für den 6. Kongress der Internationalen Architekturvereinigung 1961 am Südufer der Themse in London (Abb. 42) *Davis (2/1962), 107*. Mit diesen zusammengesetzten Strukturen befasst sich das ganze Team am Battersea College of Technology in London über einen langen Zeitraum von 1958 an, 1968 kommen noch Hyparschalen aus GFK hinzu *Makowski (7/1968)*.

Die Bildung der zusammengesetzten Raumgittertragwerke war einzigartig in der Entwicklung von Tragwerken aus FVK, da hier die positiven Eigenschaften des Materials genutzt wurden und die weniger positiven durch das gemeinsame Tragverhalten mit anderen Materialien kompensiert wurden. Während Robak und Gilkie eher theoretisch arbeiteten, realisierte Piano eine Reihe von solchen Strukturen nicht nur als Prototyp. Ein weiterer enger Mitarbeiter von Makowski, B.S. Benjamin, befasste sich mit der Anwendung von FVK im Industriebau und im Flugzeugbau. Seine umfassenden Kenntnisse über jegliche Strukturformen dokumentiert er in seinem Buch *Benjamin, Structural Design with Plastics (1969)*. Maßgeblich beteiligt war er auch an der Entwicklung der Battersea Falttragwerke 1969 (Abb. 44, 45).

Festzuhalten ist, dass diese Forschergruppe unter Leitung von Z. S. Makowski überaus erfolgreich arbeitete. Neben fundierten Bemessungshilfen für tragende Kunststoffe entstand eine Reihe von Bauten. Makowski war zudem ein unermüdlicher Publizist und wurde auch von Hansjürgen Saechtling für die Hauptkapitel „Tragwerke“ des umfassenden Handbuches „Bauen mit Kunststoffen“ *Saechtling (1973)* verpflichtet. Die vom Institut ins Leben gerufenen Tagungen waren zahlreich. Diese erfolgreiche Bilanz ist auf Makowskis umtriebigen Wesen und auf sein Gespür bei der Zusammenstellung des Forscherkollegs zurückzuführen.

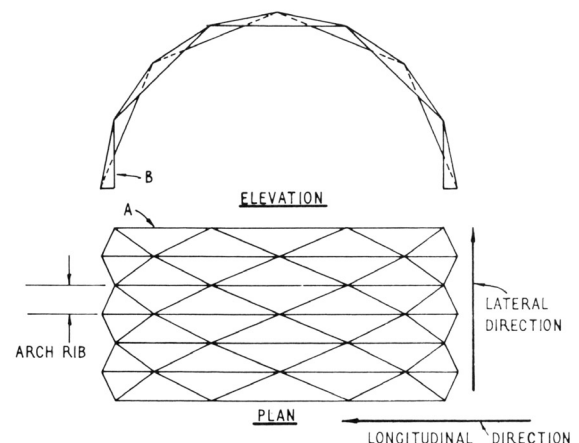
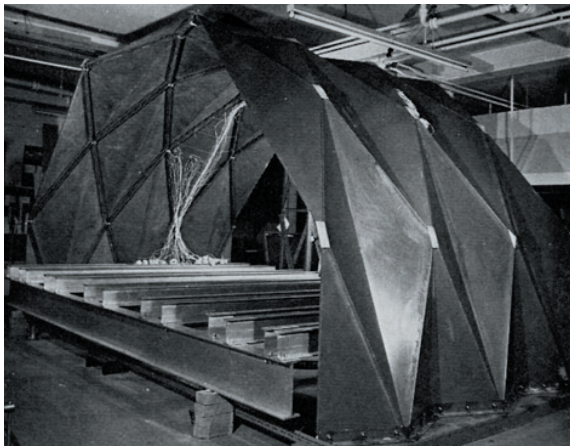
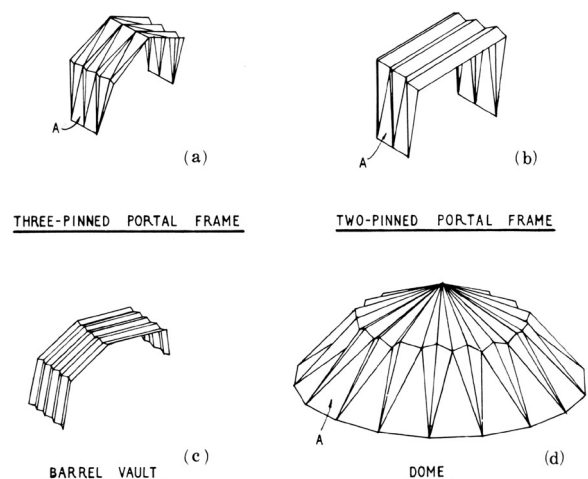


Abb. 44 (oben links) und 45 (oben rechts)
Tonnenschalen, gebildet aus Faltelementen, untersucht am Institut von Makowski durch Benjamin *Benjamin (1969), 139*
Abb. 46 (unten rechts)
Möglichkeiten der Bildung von Tragwerken aus gleichen Elementen aus GFK *Benjamin (1969), 138*

Abb. 42 gegenüberliegende Seite (unten links)
Gebäude der Tagungsleitung in London mit Aluminium-Pyramiden *Davies (1962), 107*
Abb. 43 gegenüberliegende Seite (unten rechts)
Detail eines Daches in Texas mit GFK-Pyramiden *World Conference (1962)*



Stevin-Laboratorium, Delft Technological University Pieter Huybers, A.J. Wildschut

1962 gründete A. J. Wildschut in Delft eine Forschergruppe, deren Beschäftigungsfeld sehr an das von Makowski in London erinnert. Das Ziel der Forschungen wird jedoch wie folgt beschrieben:

„Die Forschungsgruppe für Kunststofftragwerke am Stevin-Laboratorium ging bei ihren Überlegungen davon aus, Tragwerke zu entwickeln, bei denen die Einzelemente nicht nur Zug-, sondern auch Druck- und Biegespannungen aufnehmen sollen. [...] Die Einzelemente sollen möglichst einheitlich sein und eine Größe haben, die Massenfertigung mit individuellen Methoden erlaubt. [...] Aus diesen und aus wirtschaftlichen Gründen beruht die Arbeit der Forschungsgruppe auf zweiaxig ausgebildeten Faltwerken mit hauptsächlich rechteckigem Grundriß.“ *Huybers/Wildschut(1971), 4*

Die Forschungsgruppe untersucht unterschiedliche Faltstrukturen mit Hinblick auf die Tatsache, dass sich das Dach selbst entwässert und/oder das es eine rechteckige Fläche abdeckt. Im Oktober 1969 wird eine temporäre Überdachung in Den Haag mit 15 m Spannweite errichtet (Abb. 47), die neun Monate steht. Eine weitere Überdachung im Eingangsbereich einer Fabrik in Delft wird getestet und geprüft (Abb. 48).

Mehr noch als Wildschut ist der Name Huybers mit der Forschungsgruppe für Kunststoffe verbunden. Huybers promovierte über Raumstrukturen „See Through Structuring“ *Huybers (1972)* in Delft und befasste sich fortan mit zellulären Raumstrukturen für große Spannweiten. In *Huybers (1973), 106* erläutert der Verfasser detailliert sowohl kuppelförmige Konstruktionen als auch die Verwendung von Polyedern aus FVK in einer räumlichen Struktur und behauptet, dass sich mit Polyedern „sämtliche raumfüllende geschlossene Kombinationen erzielen lassen.“ Huybers stellt geometrische Beziehungen innerhalb solcher Raumstrukturen aus regelmäßigen Polyedern auf, d.h. er legt die Abhängigkeiten der Form des Dreieckselementes, definiert durch α und die Krümmung, definiert durch den Faltwinkel γ , die Seitenlängen b und die sich ergebende Tiefe des Raumgitters an (Abb. 108). Somit geht er noch tiefer in die Materie als Z.S. Makowski, ja er nimmt sogar die von Makowski, Benjamin und Piano gebauten Strukturen zum Anlass seiner Untersuchungen (Abb. 108). Auch die theoretischen Untersuchungen von Robak und Gilkie zu Raumgitterstrukturen betrachtet Huybers genau „*Gilkie und Robak* schätzen, daß Pyramiden aus unverstärkten thermoplastischen Kunststoffen gegenwärtig für Spannweiten bis zu 9 m verwendet werden können. Nach ihrer Ansicht sollte die minimale zweckmäßige Größe im Grundriss $0,6 \times 0,6$ m betragen. Größere Spannweiten erfordern stärkere Materialien, es kommen dann GUP oder verstärktes PVC in Frage. Spannweiten bis 20 m und mehr sind möglich, die Pyramiden müssen dann entsprechend größer sein.“ *Huybers (1/1971)* Huybers nutzt diese vorgeschlagenen Raumgitterstrukturen und baut selbst einige Konstruktionen mit großer Spannweite, z.B. Tonnen mit 25,70 m Spannweite (Abb. 51). Alle Komponenten sind identisch und vorfabriziert. Seine eigenen Untersuchungen an solchen Raumgitterstrukturen ergeben, dass man bis zu 40 m weit spannen könnte (Abb. 50).

Huybers entwickelt eigene Faltstrukturen, die als Kugel oder stehende Zylinder verwendet werden können (Abb. 49). „Die Berechnung zeigt, daß Werkstoffe ausreichend sind, die einen 15 bis 20mal kleineren E-Modul als glasfaserverstärkter Polyester aufweisen. Man kann daher den Einsatz von harz imprägnierter Pappe in Erwägung ziehen.“

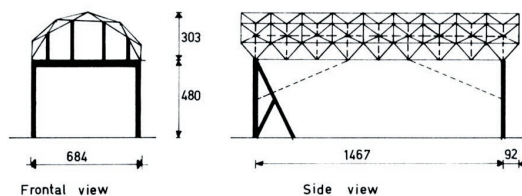


Abb. 47 (links)

Temporäre Überdachung in Den Haag mit 15 m Spannweite, entwickelt am Stevin Laboratorium in Delft *Huybers (1972), 204*

Abb. 48

Überdachung des Eingangsbereiches einer Fabrik in Delft, die dem Forschungskolleg zu Versuchszwecken diente *Huybers (1972), 40*

Bedeutung:

Ebenso wie auch Du Château ist Huybers Wegbereiter der Ingenieure, die sich mit Raumstrukturen befassen. Das Erarbeiten von Vorschlägen für Strukturen mit FVK ist nur ein kleiner Teil seiner Arbeiten, ihm geht es um das Erfassen der geometrischen und mechanischen Abhängigkeiten innerhalb dieser Strukturen an sich. Er baut später einige große Überdachungen, darunter die Tribüne für ein Stadion in Split. Aus der intensiven Untersuchung der Arbeiten Makowskis entsteht keine Konkurrenz, sondern ein reger Gedankenaustausch. Beide Autoren veröffentlichen später einige gemeinsame Artikel zu Raumstrukturen.

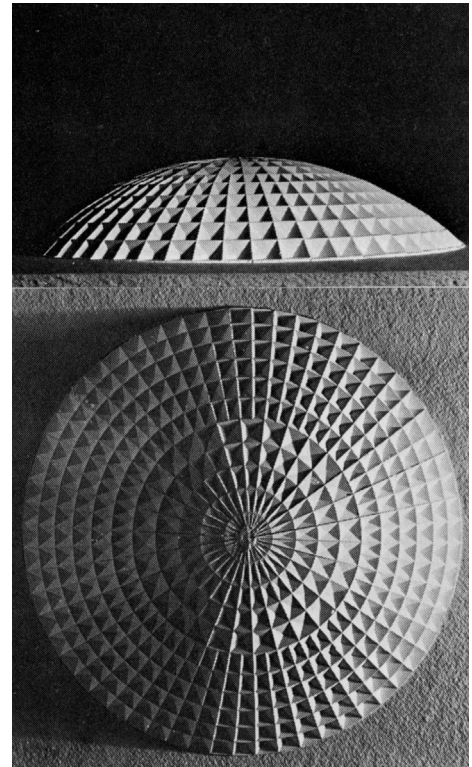
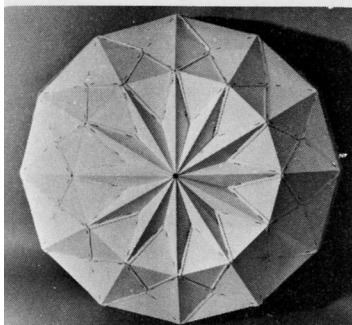
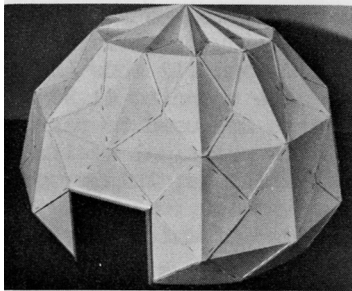
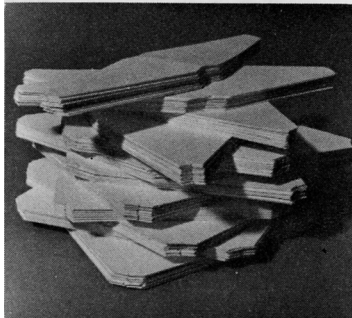
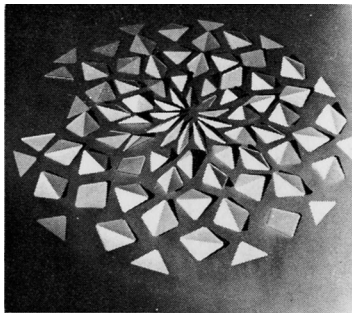


Abb. 49 (links)

Faltstrukturen von Pieter Huybers, die als stehende Zylinder verwendet werden können

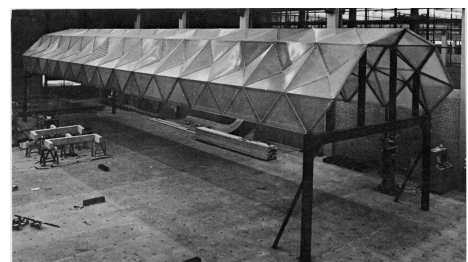
Abb. 50 (oben rechts)

Untersuchungen an Raumgitterstrukturen erbrachten mögliche Spannweiten bis zu 40 m

Abb. 51 (unten rechts)

Tonnenschale mit 25,70 m Spannweite

Huybers (1972)



Institute - Theoretiker

Die Flugzeugbauer

Wie im einleitenden Kapitel bereits erwähnt, waren nach Ende des 2. Weltkrieges große Teile der Wirtschaft und Industrie gezwungen, sich neuen Arbeitsfeldern zu widmen. Was für die Produzenten galt, lässt sich gleichermaßen für Nicht-Produzenten feststellen. Eine große Anzahl von Wissenschaftlern konnte und musste ihr Wissen nun für andere Anwendungen bereitstellen. In ganz besonderem Maße galt dies für die Flugzeugindustrie und die damit in Zusammenhang stehende Konstruktionsforschung.

Die Flugzeugbauer in Amerika

Der überwiegende Teil der in der Flugzeugforschung befindlichen Ingenieure konnte in der Nachkriegszeit die noch jungen Leichtbauweisen weiterentwickeln und sie sowohl der zivilen Luftfahrt, als auch dem Boots- und Schiffsbau und der Automobilindustrie zu Verfügung stellen. Als man begann, Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen zu entwickeln, konnte die Bauindustrie auf die Erfahrungen mit dem Material in den eben genannten Industrien zurückgreifen. Dies betraf hauptsächlich die verwendete Herstellungs- und Verarbeitungstechnologie, über die zwischen 1945 und 1955 in der Zeitschrift *Modern Plastics* viel veröffentlicht wurde. Die Herstellungstechnik für Tragwerke aus FVK wurde aus dem Bootsbau übernommen (Abb. 65).

Eine umfangreiche Literaturliste zu den von der US-Air-Force erstellten Forschungsberichte findet sich in *Hintersdorf (1965)*, 73. Der Dresdener Flugzeugbauer Gert Hintersdorf hatte zu Beginn seiner Arbeiten etwa 1959 bei amerikanischen Instituten angefragt *Genzel/Hintersdorf (03.08.2005)* und entsprechendes Material über Sandwichkonstruktionen mit Kunststoffen und deren mechanische Kennwerte aus den Jahren 1952-1959 erlangt. Mit diesem Leichtbauwissen war einem geschulten Ingenieur die Bemessung eines Tragwerkes aus verstärkten Kunststoffen möglich, nur besaß damals nachweislich kaum einer der bemessenden Ingenieure diese Schriften. Erste Veröffentlichungen in den USA, die die Architekten und Ingenieure ansprechen sollten, liegen mit *Dietz (1949)* und *Sonneborn (1954)* vor.

Die Institute der Flugzeugbauer in der BRD

Bereits vor Kriegsende werden einige Institute der deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt von Berlin nach Süddeutschland verlegt, nach Kriegsende müssen die Arbeiten zur Luft- und Raumfahrt eingestellt werden. Erst 1957 kommt es zu einer Wiederbelebung der Deutschen Forschungsanstalt für Luftfahrt (DFL), 1961 gilt als der offizielle Beginn der Raumfahrtforschung der Bundesrepublik Deutschland. Im gleichen Jahr umkreist Juri Gagarin die Erde www.dlr.de/archiv/frame.htm. Die Wiege des Flugzeugleichtbaus ist der Metall-Leichtbau *Schapitz (1951)*. Erst seit Beginn der 1960er Jahre finden sich Veröffentlichungen zu Kunststoff-Leichtbauweisen aus dem Flugzeugbau. In der deutschen Zeitschrift „Kunststoffe“ veröffentlichten Ulrich Hütter und sein Mitarbeiter H. Conen von der Deutschen Forschungsanstalt der Luft- und Raumfahrt, Abteilung Bauweisen Forschung in Stuttgart und A. Puck und H. Wurtinger vom deutschen Kunststoffinstitut (DKI) als erste Flugzeugingenieure Kennwerte und Dimensionierungsvorschläge für tragende Leichtbauteile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen *Hütter (6/1960)*, *Puck (3/1963)*, *Puck (10/1963)*. Das deutsche Kunststoffinstitut (DKI) wurde 1955 in Darmstadt gegründet und erwuchs aus einer der 1945 stillgelegten, aber weiterhin eingetragenen Einrichtungen der DFL. Puck und Wurtinger geben mit ihrem Wissen den Bauingenieuren das Werkzeug in die Hand, um auch Tragwerke zu bemessen. Die verschiedenen Modellvorstellungen zur Bemessung – die Laminat- oder Netztheorie – stammen ursprünglich von den Flugzeug- und Maschinenbauern. Auch das Problem der Krafteinleitung bei Bauteilen aus Glasfaserkunststoffen wird von zwei Flugzeugkonstrukteuren behandelt. Die Vorschläge von Hütter und Conen *Conen (2/1966)*, *(9/1966)* können jedoch für das Bauwesen nicht appliziert werden.

Die Institute der Flugzeugbauer in der DDR

Auch in der DDR gingen alle Entwicklungen auf dem Gebiet des Bauens mit faserverstärkten Kunststoffen vom Flugzeugbau aus. Diese Aussage stammt von einer Persönlichkeit dieser Zeit, Gert Hintersdorf *Genzel/Hintersdorf* (03.08.2005), der den meisten Ingenieuren später durch sein Buch „Tragwerke aus Plasten“ bekannt wurde. Wie kam es zu dieser Hinwendung zum Bauwesen? Ein Brief von *Gert Hintersdorf* (22.08.2005) klärt diese Frage ebenso auf, wie die Unklarheiten bezüglich der wesentlichen Integrationsfiguren in der DDR.

„Ihre 1. Frage an mich war: wann und wo habe ich angefangen, mich um die Bemessung von faserverstärkten Kunststoffen zu kümmern ?

Ich muss hier ausschweifen. Ich studierte an der Technischen Hochschule in Dresden an der Fakultät für Luftfahrtswesen das Fach Flugzeugkonstruktion. Im letzten Semester bewarb ich mich bei Professor Landman als Hilfsassistent. Ich kam in den Bereich neue Bauweisen. Diesen Bereich leitete Herr Ing. Bernert. Er hatte als Flugzeugkonstrukteur in Dessau in den Junkerswerken gearbeitet und war nach dem verlorenen Krieg (wie auch Professor Baade, Ing. Wogeck und andere) mit ihren Familien in die damalige Sowjetunion weit hinter Moskau in ein russisches Flugzeugwerk verbannt worden. Dort entwickelten sie das Passagierflugzeug 152, welches dann in Dresden gebaut wurde. Das tragische Ende ist sicher bekannt, es lag aber eindeutig an den Fehlern des Testpiloten und nicht an den neu eingeführten Leichtbauweisen.

Damit dürfte auch geklärt sein, das Herr Bernert derjenige war, der sowohl die glasfaserverstärkten Kunststoffe als auch die Sandwichbauweise in der DDR einführte. [...] Nach Abschluss meines Studiums [1957, Anm. des Verfassers] blieb ich in der Truppe Bernert, die dann wenige Wochen später vom Forschungszentrum der Luftfahrtindustrie in Dresden-Klotzsche übernommen wurde. Hier entstanden neben den ersten Teilen für den Flugzeugbau auch die ersten Teile für das Bauwesen.“

Der Brief befindet sich in Übereinstimmung mit den Aussagen von Günther Ackermann, der zwar im Zitat nicht erwähnt wird, der aber parallel wesentliche Arbeiten zur Bemessung von FVK lieferte. Ackermann war seit Beginn der 1970er Jahre mit FVK befasst und wurde später häufig mit der Prüfung von Tragwerken, besonders von Ingenieurbauwerken aus diesem Werkstoff, betraut. Er fasst das Bauen von Tragwerken aus FVK in der DDR in seinem Artikel *Ackermann (2001)* zusammen. Seine umfassenden Bemessungsregeln, die im Kapitel Bemessung behandelt werden, sind darin nicht erwähnt. Gert Hintersdorf ist neben Günther Ackermann einer der ganz wenigen Ingenieure, die ihr berufliches Leben in großem Umfang den faserverstärkten Kunststoffen widmeten. Mit seinen Veröffentlichungen *Hintersdorf, Stützstoffbauweise (1965)*, *Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke (1965)*, *Bernert, J.; Hintersdorf, G.; Wende, JfL-Mitteilungen (1966)*, *Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Praktische Dimensionierungsverfahren (1966)* und besonders seinem Buch *Hintersdorf, Tragwerke aus Plasten (1972)* gibt er den Bauingenieuren ein wesentliches Gerüst, anhand dessen es möglich ist, jedes beliebige Tragwerk aus FVK einzuschätzen und zu bemessen.

Um die Verbindungen der sich mit Tragwerken aus Kunststoffen befassenden Institute innerhalb der DDR zu verdeutlichen, dient die folgende Übersicht, die sowohl von Hintersdorf als auch Ackermann bestätigt wurde.

1. Institut für Kunststoffe der Deutschen Akademie der Wissenschaften (DAW) der DDR Sitz: Berlin Mitarbeiter: Direktor: Dr. A. Wende, Gert Hintersdorf (ab ca. 1960) Manfred Badstube J. Bernert Aufgaben: Grundlagenforschung, Fasern	2. Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen (IFL) Sitz: Dresden Mitarbeiter: Prof. Knauer, Hintersdorf/Badstube (zur Bemessung der Turmspitze des Berliner Fernsehturmes, 1966 gebaut) Aufgaben: Grundlagenforschung; optimale Werkstoffausnutzung, Materialeinsatzstruktur (Verwendung flächig, gekrümmt, isotrop)	3. Institut für Bau- und Faserbaustoffe Sitz: Berlin Mitarbeiter: Gert Hintersdorf seit 1965 Aufgaben: Konstruktion und Bemessung von Bauteilen aus FVK	4. Institut für Baustoffe der Deutschen Bauakademie (DBA) Sitz: Weimar Mitarbeiter: Prof. Dr. Günter Ackermann (seit 1978) Aufgaben: Beurteilung und Prüfung von Tragwerken aus FVK
6. (Beauftragung durch 1.) Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin, Institut für Gemüsebau und Großbeeren Sitz: Berlin Aufgaben: Tests von dünnwandigen Bauteilen aus GFK für Gewächshäuser,	5. (zugehörig zu 4.) Institut für Faserbaustoffe Sitz: Leipzig Aufgaben: Untersuchung der materialtechn. Eigenschaften von FVK in Hinblick auf dessen Verwendung im Bauwesen		

Quelle: *Genzel/Ackermann (19.07.2005)*

Die Bauingenieure

Von den theoretisch arbeitenden Instituten beginnen die Bauingenieure erst spät mit der eigentlichen Forschung und Bereitstellung von Dimensionierungsgrundlagen. Die Forschungen unterscheiden sich von denen der Maschinen- und Flugzeugbauer vor allem in zwei Punkten:

1. Die Einschätzung der richtigen Zeitdauer der tatsächlich anfallenden Lasten ist von grundlegender Bedeutung.
2. Die zeitabhängigen Veränderungen des Materials über die Lebensdauer eines Gebäudes betrachtet, sind von großer Wichtigkeit.

Die Bauingenieure versuchen also, bereits vorhandenes Wissen, vor allem aus dem Flugzeug- und Maschinenleichtbau aufzunehmen und weiterzuentwickeln. Dazu sind vor allem gezielte Langzeituntersuchungen an Tragwerken nötig oder, um darauf zu verzichten, mathematische Modellierungen des Verhaltens der Kunststoffe unter Last.

RWTH Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) Georg Menges, E. Dolfen, E. Schwarz, Rainer Taprogge

Am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) an der RWTH Aachen forschen Verfahrenstechniker und Maschinenbauer wie Georg Menges zum Einsatz tragender Bauteile aus FVK. Die Forschungen, die später an der gleichnamigen Hochschule von Helmut Domke an der Fakultät der Bauingenieure ausgehen und die neue Ansätze und Modellvorstellungen verfolgen, sind eindeutig von Menges und seinem Team inspiriert *Domke (5/1975)*. Menges erarbeitet mehrere Bemessungsverfahren, die im Kapitel 5 erläutert werden. Nach einem Überschlagsverfahren *Menges (1967)* empfiehlt Menges die genauere Bemessung nach der Grenzdehnung *Menges (1970)*. Die Betrachtung einer Grenzverformung, unterhalb derer keine Werkstoffschädigung eintritt, verfolgt später auch Domke anstelle des Nachweises der Grenzspannung.

Das IKV Aachen trägt zur Klärung der oben aufgeworfenen Fragestellungen maßgeblich bei. Für die im Bauwesen gebräuchlichsten Faser-/Matrixkombinationen ermitteln die Mitarbeiter des Institutes Zahlenwerte für Kurz- und Langzeitfestigkeit *Menges/Schwarz (1969)*, die in dieser Vielzahl bis dahin ihresgleichen suchten. Das vorgeschlagene Überschlagsverfahren entsteht 1969 und somit zu einem Zeitpunkt, da die Erkenntnisse noch von den Hauptvertretern des Bauens mit Kunststoffen rezipiert werden können.

RWTH Aachen, Lehrstuhl konstruktive Gestaltung Helmut Domke, Alfred Rübben



Abb. 52
Helmut Domke
pc (3/1977), 103

Helmut Domke wird 1963 aus seiner Tätigkeit als beratender Prüfenieur als Professor für Ingenieur- und Wasserbau an die RWTH Aachen berufen. Er ist in zahlreichen Normenausschüssen, was ihm bei seiner Durchsetzung von Bemessungsregeln für Tragwerke aus FVK nützlich sein sollte, außerdem ist er Mitglied des von Amtor Schwabe 1970 gegründeten I.C.P. International Club for Plastics Use in Building and Building Engineering.

Neben seinem Lehrstuhl „Konstruktive Gestaltung“ richtet er 1972 das Lehrgebiet „Kunststoffbau“ ein. Die Zeitschrift *plasticconstruction* schreibt hierzu:

„Zu Beginn des Wintersemesters 1972/1973 wurde das Lehrgebiet ‚Kunststoffbau‘ von der Fakultät für Bauwesen an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen als Teil der Bauingenieursausbildung eingerichtet. [...] Die bisherige Entwicklung der in Deutschland neuen Vertieferrichtung wurde von dem Bemühen bestimmt, die zahlreichen bereits vorliegenden Forschungsergebnisse systematisch aus Sicht der Bauingenieure auszuwerten und weiterzuentwickeln. Zur wirtschaftlichen Berechnung häufig im Bauwesen auftretender statistischer Lastfälle wie Wind, Schnee, Silolasten und Temperatur wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die das Ziel hatten, Werkstoffeinfluss sowie Last- und Temperaturgang unabhängig voneinander zu erfassen. Das hat zur Definition der Begriffe ‚Kriechlast‘ und ‚Kriechtemperatur‘ geführt, die bei künftigen Normungen nicht unberücksichtigt bleiben können.“ *plasticconstruction* (1/1977), 11

Der Lehrstuhl wurde vom Institut für Kunststoffverarbeitung (G. Menges) und anderen Instituten der RWTH Aachen sowie dem Institut für Bautechnik in Berlin unterstützt. Die Kurse wurden jährlich von 40 Studenten im 7. und 8. Semester besucht. Es entstanden zahlreiche Dissertationen und Diplomarbeiten.

Domke entwickelte ein eigenes Bemessungsverfahren, mit denen tragende Kunststoffbauteile effizienter bemessen werden können. Er erbringt den Beweis, „das dem Kunststoff generell geringere Belastungen aus den Komponenten Sonne, Wind und Schnee zugerechnet werden dürfen.“ *Schwabe (1977)*, 99 Das Problem besteht nur darin, dass die Untersuchungen von Domke zu spät beginnen. Zwar geben seine Veröffentlichungen einen Einblick, in welcher Größenordnung man bei richtigem Ansatz der Lasten Material spart, nämlich in etwa die Hälfte gegenüber herkömmlichen Verfahren, doch ist das Verfahren erst auf drei Standorte in Deutschland anwendbar. Das Forschungsverfahren wurde nicht weitergeführt, da es an den nötigen Geldgebern fehlte. Dies ist nicht verwunderlich, hatte doch das Interesse der Architekten am Bauen mit Kunststoffen nach 1980 rapide nachgelassen. Auch unter den Bauingenieuren herrschte eine allgemeine Skepsis dem Verfahren gegenüber. Auch wenn Domkes Nachfolger an der RWTH Aachen, Alfred Rübben gewollt hätte, verstärkte Kunststoffe für Tragwerke war kein Forschungsgegenstand mehr *Genzel/Rübben (15.10.2005)*.

Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB) Weimar

Günther Ackermann

Unter dem Dach der Deutschen Akademie der Wissenschaften (DAW) in Ostberlin arbeitete eine Reihe von Wissenschaftlern an der Erforschung von Bauweisen und Bemessungsalgorithmen für Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen. Einer von ihnen ist Günther Ackermann. Er ist eher der zweiten Generation der mit Kunststoffen befassten Bauingenieure zuzurechnen. Von 1970 bis 1978 prüft er eine Reihe von Tragwerken aus FVK für die staatliche Bauaufsicht. Da ihm die vorhandenen Schriften zur Bemessung nicht ausreichen veranlasst er Langzeituntersuchungen an ausgewählten Tragwerken. Langzeittests, die für die Lebensdauer ein Gebäudes betrachtet werden müssen, dauern mit 12 Jahren zu lange, wie Ackermann feststellt. Infolgedessen bildet er – genau wie Domke – das viskoelastische Verhalten der Kunststoffe durch ein mathematisches Modell ab und kann so schneller auf Ergebnisse zugreifen. Er verfasst eine Reihe von Schriften zur Bemessung viskoelastischer Tragwerke *Ackermann (1972), (1982)*, mit denen die Verformungen, Spannungen und Schnittgrößen von Tragwerken aus FVK zeit- und temperaturabhängig bestimmt werden können. Von 1978 bis 1998 wirkt er als Professor an der Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB) Weimar und bleibt auch dort den FVK und deren Einsatz für Tragwerke verbunden. Wie Domke in Aachen das Fach „Kunststoffbau“, richtete er das Fach „Plastkonstruktionen“ ein. Mit dem ausgegebenen Umdruckmaterial *Ackermann (1989)* konnte ein Bauingenieur sehr genau und effizient bemessen.

Einfluss:

Ackermann übt zur Zeit seines Wirkens kaum noch Einfluss auf das Bauen mit FVK in der Tragstruktur aus. Wie bei Domke ist die Hochkonjunktur des Kunststoffbaus bereits vorbei, seine Erkenntnisse werden nicht mehr abgefragt. Heute arbeitet Ackermann in einigen Gremien mit, die sich mit der Bemessung von Tragwerken aus FVK befassen, z.B. dem „Bau- und Überwachungsverein Tragende Kunststoff-Bauteile“. Das Einbringen seiner Erkenntnisse ist äußerst wichtig, denn es bedeutet effizientes Bemessen bei geringem Mehraufwand. Er selbst bedauert, dass die zeit- und lastabhängigen Veränderungen der Kunststoffe in den aktuellen Empfehlungen noch nicht ausreichend Berücksichtigung gefunden haben.

Die Bauingenieure an den Universitäten zählen nicht zu den Pionieren des Kunststoffbaus. Sie liefern exakte Grundlagen zum effektiven Bemessen, die nötig und wesentlich sind. Ihr Einfluss und ihre Inspiration innerhalb der Fachwelt ist jedoch gering, was maßgeblich dem schnellen Abklingen der Hochkonjunktur des FVK-Baus zuzuschreiben ist.

Koordinatoren

Institut für das Bauen mit Kunststoffen (IBK)

Baurat Amtor Schwabe, Hansjürgen Saechtling

Eine Person hat einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Geschicke des Bauens mit Kunststoffen ausgeübt – Regierungsbaurat und Architekt Amtor Schwabe. Eine charismatische Persönlichkeit, die sich dem Bauen mit Kunststoffen vollkommen verschrieben hatte. In den 30 Jahren seines Wirkens am Institut für das Bauen mit Kunststoffen, beim Arbeitskreis Bauen mit Kunststoffen und anderen Institutionen zwischen 1957 und 1977 war sein Eifer und seine Integrationsfähigkeit unerreicht. So gibt es auch den Grußworten von *Forster (1977)*, 27 zur Verabschiedung Schwabes kaum etwas hinzuzufügen:

„Das war für Kunststoffe noch eine echte Pionierzeit [Anm. d. Verf.: Gründungszeit des Arbeitskreises „Bauen mit Kunststoffen“ des DAI durch Amtor Schwabe 1957]. Der Begriff Kunststoffe hatte fast eine magische Wirkung. Viele Unternehmer meinten, das sei zukunftsträchtig, man müsse mitmischen und dabei sein. [...] In diesem Nebel von falschen Vorstellungen, von weit verbreiteter Unkenntnis, begannen Sie, auf dem Gebiete des Bauens Klarheit, Ordnung, solide Fachkenntnisse zu schaffen. Daß Ihnen dies in einer hohen Masse gelungen ist, daß Ihr Institut heute international als Informations- und Beratungszentrum anerkannt ist, ist Ihr Verdienst.“

In seinen Schubladen sammelte und archivierte Schwabe Bücher, Zeitschriftenartikel, Fotos und Adressen. „Es gab ja Herrn Schwabe, der alles wußte, überall herumkam, mit kundigem Blick richtungsweisendes findet und – was das wichtigs-

te ist – das Problem richtig beurteilt und dem Interessenten eine komplette Dokumentation und Informationen anbieten kann.“

Ohne Amtor Schwabe wäre die Geschichte des Kunststoffbaus zumindest in Europa schleppender verlaufen. „Ihre Tätigkeit war eine weitgreifende. [...] Man kann folglich sagen, daß Schwabe und sein IBK die Anwendung von Kunststoffen im Bauwesen nicht nur vorangebracht, sondern deren Einführungszeit beträchtlich verkürzt haben.“

Am ganz konkreten Beispiel des Wohnhauses fg 2000 von Wolfgang Feierbach lässt sich das gesamte Wirkungsspektrum des IBK unter Schwabe nachvollziehen. Feierbach, der nach der erfolgreichen Produktion einiger Möbelserien aus Glasfaser-Polyester ein komplettes Haus aus Kunststoffen bauen wollte, wendete sich an Schwabe und das IBK. Das Leistungsangebot des IBK: „nehmen (sammeln) – verarbeiten/aufbereiten - + geben“ war hier Programm.



Abb. 53
Amtor Schwabe
pc (3/1977), 103

Saechtling, Hansjürgen

Der Chemiker Hansjürgen Saechtling wurde die rechte Hand von Amtor Schwabe am IBK. Nach seiner praktischen Erfahrung in der Dynamit Nobel AG in Troisdorf von 1940 bis 1955 wird er von Schwabe für die administrativen Aufgaben beim Bauen mit Kunststoffen gewonnen. Zwischen 1955-69 war er Geschäftsführer der Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie (AKI) und bekam damit die Federführung der Kunststoffausstellungen K'55, K'59, K'63 und K'67 sowie der Durchführung der Deutschen Kunststofftagungen 1957 und 1967. Neben seiner Verbandstätigkeit, der Konzeption und Organisation großangelegter Informationsprogramme für Kunststoffindustrie und -verbraucher war er Sachverständiger für wissenschaftliche Aufgaben, seine Kontakte zur Industrie waren weitreichend. Mit seinem Namen ist vor allem das umfassende Nachschlagwerk *Saechtling* (1973) verbunden. Zwar war Schwabe das Zugpferd am Institut für das Bauen mit Kunststoffen, als Partner war Saechtling jedoch für Schwabe unerlässlich.

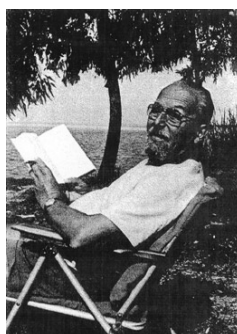


Abb. 54
Hansjürgen Saechtling
pc (3/1979), 75

Einfluss:

Der Einfluss des IBK durch Schwabe und Saechtling war bedeutend. Das IBK hatte 1972 über 350 Mitglieder, 40 % kamen aus der Kunststoffindustrie, 50 % aus verschiedenen Bereichen des Bauwesens. Auch international war man erfolgreich, der Anteil der Ausländer innerhalb der Mitglieder betrug immerhin 20 %.

Schwabe und Saechtling trugen wesentlich dazu bei, dass sowohl Inspirationen als auch Handwerkszeug bereitgestellt wurde.

Der Erfolg macht sich auch an den gegründeten Organen deutlich:

- die Zeitschrift „Kunststoffe“ existierte bereits seit 1911, hier bringen sich Schwabe und Saechtling mit ein
- ab Januar 1958 veranlassen sie das Erscheinen der Zeitschrift „Bauen mit Kunststoffen“ als Mitteilungsblatt bis 1972, Auflage von 7000 Exemplaren.
- ab 1965 Schritt zur Zeitschrift mit größerer Auflage „Kunststoffe im Bau“
- 1958-1989 Erscheinungsverlauf der „Bauen mit Kunststoffen“
- 1965-1985 Erscheinungsverlauf der „Kunststoffe im Bau“
- 1971-1977 Erscheinungsverlauf der „plasticconstruction“

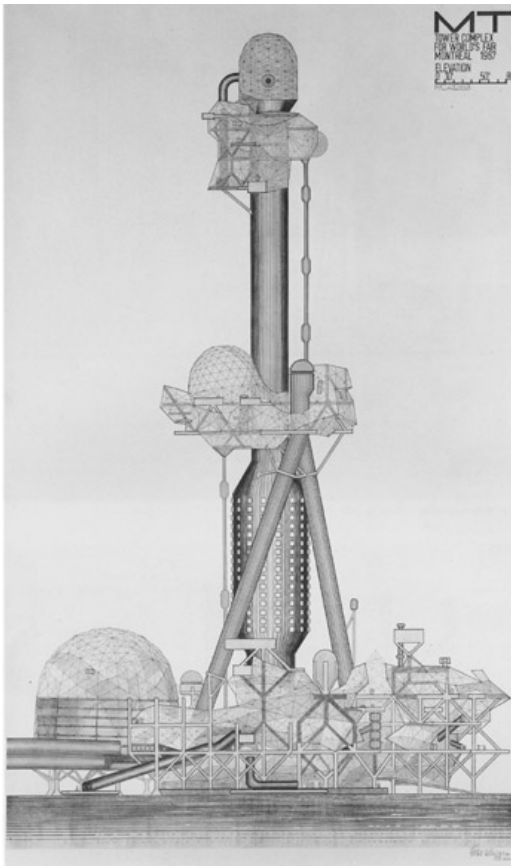


Abb. 55
städtebauliche Utopien wie die Strukturen der Gruppe Archigram waren eine Inspiration für viele Kunststoffhäuser Klotz (1986), 317

Architekten

Was für Tragwerke wären ohne das Wirken von Architekten entstanden? Diese Frage lässt sich recht leicht beantworten. Gab es doch zur Zeit des Kunststoffbaus eine Region, die ohne Architekten die meiste gebaute Umwelt realisierte. Die Rede ist von den Ländern des Ostblocks, speziell von der DDR. Wichtige Personen, die uns Bemessungshilfen zur Verfügung stellten, wie Gert Hintersdorf oder Günther Ackermann, wurden schon besprochen. Die Rede war auch von Tragwerken für Zweckbauten wie Gewächshäuser, Kühltürme, Bushaltestellen usw., aber nicht von Tragwerken für ein individuelles Haus. Die Suche nach einem „Kunststoff-Architekten“ in der DDR ist vergebens – es gab ihn nicht *Genzel/Hintersdorf* (13.10.2005). Im Osten verlangten die gestellten Aufgaben selbst – lichtdurchlässige und bruchssichere Gewächshäuser, Silos, die nicht rosten usw. – nach dem geeigneten Material, dem Glasfaserkunststoff.

Im Westen Europas hingegen waren die Architekten die Initiatoren des Kunststoffbaus, konnten sie doch mit diesem

frei formbaren Material die utopischsten Ideen verwirklichen. Die gesellschaftliche Situation der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts bot den Nährboden und die Möglichkeiten für städtebauliche Utopien, wie sie beispielsweise von der Gruppe Archigram bekannt sind. Gerade diese Bauformen - mobil, flexibel, transportabel, industriell herstellbar - bedürfen eines Materiales, welches von leichtem Raumgewicht und beliebig form- und färbbar oder transparent sein sollte. Die architektonischen Utopien verlangten nach Kunststoffen, für tragende Aufgaben nach faserverstärkten Kunststoffen.

Wenn im folgenden nun einige wenige Architekten herausgestellt werden, so ist die Auswahl nicht beliebig. Neben Renzo Piano, der schon aus guten Gründen den Ingenieur-Architekten zugeordnet wurde, finden sich weitere Personen, die mit Kunststoffen in der Tragstruktur nicht nur entwerfen sondern auch konstruieren. Die nicht nur eine Idee aufwerfen und sie von den Ingenieuren hinrechnen lassen, sondern die mit feinem Gespür den Werkstoff materialgerecht einsetzen. Sie werden fortan Konstrukteure genannt.

Konstrukteure

Rudolf Doernach (D)

Doernach ist ein typischer Vertreter der konstruktiven Architekten. Nach seiner Assistenz bei Buckminster Fuller lehrt er an der Fulbright Scholar als Dozent für industrielles Bauen, leitet Entwicklungs- und Forschungsarbeiten für die Chemie- und Bauindustrie. In Europa bewohnte er seit 1959 mit seiner Familie 4 Jahre das erste Kunststoffhaus (TODT 4.3.1.1-1959/03), (Abb. 56). Der Prototyp ist jedoch keine reine Kunststoffkonstruktion, da zur Kantenaussteifung Stahlträger verwendet wurden.

Doernach übt in Deutschland durch seine zahlreichen Publikationen zum Thema einen Einfluss auf seine Architekturkollegen aus *Doernach (1960), (1972), (1974)*.



Abb. 56 (links)
Wohnhaus von Rudolf Doernach von 1959
im Aufbau
Doernach (1974), 28
Abb 57 (rechts)
Experiment mit Schaumkunststoffen 1974
Doernach (1974), 32

Mario Scheichenbauer (I)

Mario Scheichenbauer ist ein praktisch forschender Architekt. In seinem Architekturbüro in Mailand beschäftigt er sich mit Fertigbau und Industrie-Design und entwickelt zwischen 1964 und 1974 eine Reihe von Bausystemen, die Kunststoffe tragend einsetzen.

Das System OGAMMA beschreibt Einfamilienhäuser mit Abdeckungen aus selbsttragenden GF-UP Schalen, CEPLI ist für mehrgeschossige Häuser und berücksichtigt industrielle Fertigung. Mit PONZA entstehen Ferienhäuser mit Polyester-schalen-Dächern, welche die Wände umschließen wie der Deckel einer Tupperware (Abb. 58). Im Prinzip sind alle Systeme Vorfertigungssysteme, die auf dem italienischen Baumarkt angeboten wurden. Er schafft Montagesysteme, die nach seiner Aussage die Zeit für die Errichtung eines Hauses auf ein Drittel reduzieren *Scheichenbauer (1974)*.



Abb. 58
System Ponza von Mario Scheichenbauer
Scheichenbauer (1974)

Matti Suuronen (Fin)

Auch Suuronen erkannte den Zeitgeist und begann bereits nach seinem Studium mit Kunststoffen zu arbeiten. Als bald ergab sich die Chance (1968), eine Skihütte für einen Schulkameraden zu entwerfen. Er entwickelte einen visionären Entwurf unter Einbeziehung einer Tragstruktur aus dem neuartigen Material. Diese Kombination von ungewöhnlicher Form und Innenraumgestaltung, neuer Herstellungstechnik sowie die Eignung des Objektes für tatsächliche temporäre Aufstellung, sicherten Suuronen und dem Futuro einen unumstößlichen Platz auf dem Olymp der ausgeführten Kunststoffbauten. Das Futuro ist die Ikone des „Space Age“ schlechthin.

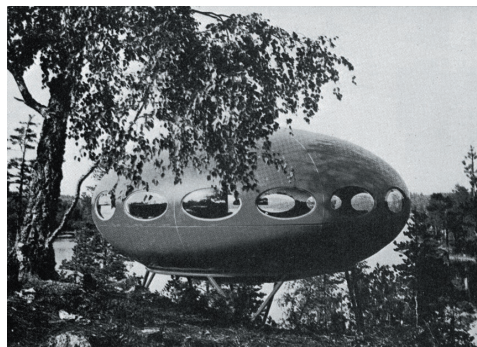


Abb. 59 (links)
Matti Suuronen
Home (2003)
Abb. 60
Futuro
Quarmby (1974)

Arthur Quarmby (GB)

1959 hat der Architekt Arthur Quarmby als Mitglied der Forschungs- und Entwicklungsgruppe der Architektursektion innerhalb der Eisenbahngesellschaft British Rail ersten Kontakt mit FVK. Er entwickelte dort mehrere Relay Rooms, 1961 das erste in Huddersfield. Er gewann den „Horners Award for plastics design“ und bereiste mit dem Preisgeld Europa, besichtigte die Bauten aus FVK von Ionel Schein in Paris, Cesar Pea in Milan, Wym Pijpers in Holland etc. Nachdem er British Rail verlassen hatte, war er fortan 1964-1972 Berater der Distillers Plastics Development Company, die durch die B.P. Chemikalien P.L.C. aufgesogen wurde.

Neben der Entwicklung von kleineren Objekten, z.B. ein Boot und Survival Capsule, Faltstrukturen, aufblasbare Möbel, Bäder etc. war vor allem seine Publikations- und Integrationstätigkeit *Quarmby* (1974) für den Kunststoffbau in Großbritannien von Nutzen *Quarmby* (14.03.2005).

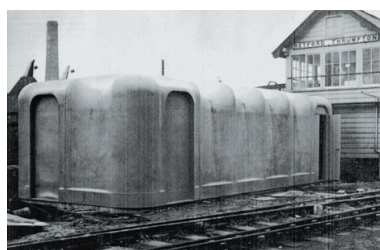
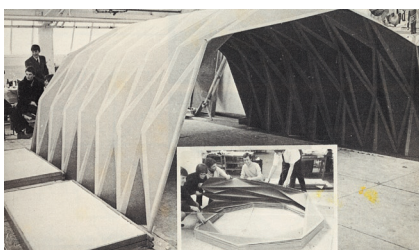


Abb. 61 (links)
Faltstrukturen von A. Quarmby
Abb. 62
Relay Rooms 1961
Quarmby (1974)

3. Die Technik

3.1 Vorläufer und parallele Entwicklungen anderer Baustoffe

Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur bedeutet nicht zwingend die Entwicklung neuer Tragwerke und auch nicht die Entwicklung einer neuen Baustatik. Zwar werden bekannte Tragsysteme, beispielsweise Faltwerke, für den Kunststoff so modifiziert, dass sie mit ihren ursprünglichen Verwandten, den Beton-Faltwerken, nicht mehr viel gemein haben. Auch ist die Theorie einer Stahlbetonplatte mitnichten ausreichend für das Erfassen der konstruktiv-technischen und stoffkundlichen Zusammenhänge des neuen Verbundwerkstoffes aus Fasern und Matrix. Obwohl auch der Verbundwerkstoff ähnlich wie Beton aufgebaut ist: aus einem druckfesten Material, dem Harz, und einem zugfesten, den Fasern.

Den Erbauern von Kunststofftragwerken kommt zugute, theoretisches und praxisgerechtes Handwerkszeug aus einer anderen, bereits etablierten Bauart zu gewinnen – dem Stahlbetonbau. Während es im Betonbau möglich war, gekrümmte Flächentragwerke ohne Bauteilfugen herzustellen und damit eine Membrantragwirkung zu erreichen, wurden im Kunststoffbau die Flächentragwerke aus Einzelteilen zusammengesetzt. Im Gegensatz zum Betonbau ist es nicht möglich, die Bauteile vor Ort zu schalen, da man FVK nur unter Werkstattbedingungen schalen kann (sh. 3.3). Durch diese Tatsache bedingt hätten sich mindestens zwei neue Konstruktionsschwerpunkte und die dazugehörigen Theorien entwickeln müssen:

1. eine neue Fügetechnik,
2. eine neue Theorie der (geteilten) Flächentragwerke,

und weil das Material weder mit den Gesetzen von Stahlbeton noch Stahl oder Holz abzubilden war hätte sich weiterhin

3. eine praxistaugliche Theorie des Erfassens der materialtechnischen Eigenschaften und Widerstände herausbilden müssen.

Während die unter 1. und 2. genannten Entwicklungen ausblieben, wurde das Erfassen der Materialeigenschaften mit eigenen Gesetzen gemacht. Natürlich waren anfänglich nur wenige Eigenschaften untersucht worden und die ersten Pioniere ermittelten die Kennwerte zum großen Teil selbst an geeigneten Materialproben (M.I.T. am Monsanto, Heinz Isler, Heinz Hosdorf). Es gab aber parallele Entwicklungen im Flugzeugbau, die spätestens nach dem 2. Weltkrieg, also etwa 1950 fundierte Theorien bereithielten, die das Verhalten faserverstärkter Kunststoffe unter Last abbildeten *Sonneborn (1954)*, *Beyer (1960)*. Diese Theorien wurden hervorgebracht, weil sich der Laminataufbau im Detail mit keinem anderen Material vergleichen lässt. In Deutschland waren die Flugzeugbauer *Puck (1963a und b)* und *Reinhardt* wichtige Vertreter von Netztheorie und Laminattheorie. Die Modellvorstellung der Netztheorie beruht auf der Verallgemeinerung, dass das Faser-, „Netz“ allein die äußeren Beanspruchungen aufnimmt. Das Harz muss sich allerdings an der Lastableitung beteiligen, indem es die auf Druck beanspruchten Fasern stabilisiert. Diese notwendige Beteiligung des Harzes am Zusammenwirken des Verbundbaustoffes wird bei der Netztheorie vernachlässigt. Bei der klassischen Laminattheorie beteiligen sich modellhaft sowohl die Fasern als auch die Matrix an der Kraftübertragung *Michali u.a. (1994)*, 37. Puck und Reinhardt berechnen GFK in der Weise, dass die für die Kraftübertragung erforderliche Anzahl der Verstärkungslagen bzw. Rovingstränge ermittelt werden. Diese glasquerschnittsbezogene Methode hat allerdings den Nachteil, dass die Ergebnisse einen Vergleich mit anderen Materialien nicht mehr zulassen, da von den bisher üblichen Begriffen Festigkeit, E-Modul und Spannung abgegangen wird. Einige Bauingenieure leiten daher aus dieser Methode eine Kombinationsmethode ab *Hintersdorf (1972)*, 126. Dass sich die Bauingenieure Wissen von den Flugzeugbauern holten, ist insofern interessant, da sich die Flugzeugstatik selbst als eine Subdisziplin der Baustatik entwickelt hatte. Die Bauingenieure hatten also zu einem früheren Zeitpunkt den Flugzeugbauern baustatische Kenntnisse überlassen, diese entwickelten sie für ihre eigenen Belange weiter und konnten sie den Bauingenieuren so zu sagen aufbereitet wieder zur Rezeption anbieten. Ganz nebenbei stellte der Flugzeugbau dann auch noch die Theorie der finiten Elemente bereit *Kurrer (2002)*, 31.

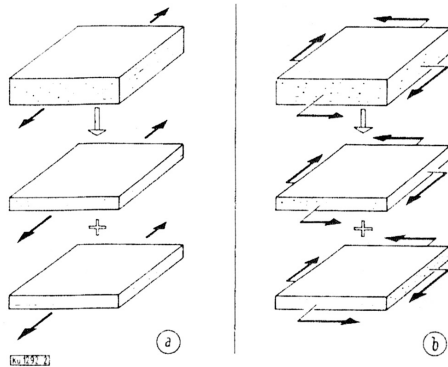


Abb. 2. Zerlegung orthogonalen Glasfaser/Kunststoffs in unidirektionale Schichten
a bei Normalkraftbelastung, b bei Schubbelastung

Abb. 63

Nach der Laminattheorie besteht das Material FVK aus einzelnen Laminatschichten, bei denen Glasfasern und Matrix die Kräfte gemeinsam übertragen Puck (12/1965)

Damit ist gesagt, dass mit dem Überschreiten der eigenen Grenzen eine Weiterentwicklung der eigenen Disziplinen gelang. Dies gilt in hohem Maße für die Geschichte von Geben und Nehmen der theoretischen Erkenntnisse zu Leichtbaustrukturen von Bauwesen und Flugzeugwesen.

Mit der Methode der finiten Elemente wurde es möglich, sämtliche Feldprobleme zu lösen und jegliche Art von Flächentragwerken zu berechnen, auch die „geteilten“ Schalen aus FVK. Allerdings konnte bis 1980 noch kein Statiker bei der Bemessung eines Kunststoff-Tragwerkes davon Gebrauch machen, denn die Rechentechnik entwickelte sich erst dann in dem rasenden Maße, dass jedem Einzelnen ein Personalcomputer zur Verfügung stand.

Bei der Entwicklung der Fügetechnik zwischen 1950-1980 standen die Entwerfer sich selbst im Wege. Sie hegten den Wunsch nach unlösbaren Verbindungen, um die Zerlegbarkeit des ganzen Gebäudes zu erhalten. Dies war eine utopische Wunschvorstellung, durch die Ideen des industriellen Zeitalters gespeist. So waren die meisten Verbindungen vom Stahlbau inspiriert, obwohl den Pionieren das Kleben als materialgerechteste Verbindung bekannt war. Andererseits waren die technischen Voraussetzung zum Baustellenkleben nicht weit genug gediehen.

„Um 1900 war die Baustatik eine Statik des Stahlbaus; 50 Jahre später galt dies nicht mehr, da insbesondere durch die vom Stahlbetonbau eingeführten Flächentragwerke die Baustatik um das große Gebiet der Theorie der Flächentragwerke erweitert wurde.“ Kurrer (2002), 371 Daran ändert sich auch mit dem Kunststoffbau nichts. Die Baustatik wird zwar durch den Flugzeugleichtbau, aber nicht durch den Bau von Tragwerken aus Kunststoffen um die Methode der Finiten Elemente bereichert. Was aber das Bauen von Tragwerken aus Kunststoffen verändert, ist die Erfassung des Materialverhaltens unter Last auf der Seite der Widerstände und das Finden der richtigen Lastansätze auf der Seite der Beanspruchungen. Um die Abbildung des Langzeitverhaltens des Materials bemühen sich alle Autoren gleichermaßen, es wird zum eigentlichen Forschungsgegenstand erhoben.

Abb. 64a

Festigkeiten von FVK in Abhängigkeit von Harz und Fasern nach Sonneborn (1954), 184

Abb. 64b

eine der ersten Bemessungsdokumentationen für eine Zylinderschale aus GRP als Composite mit verschiedenen Layern aus Sonneborn (1954), 192

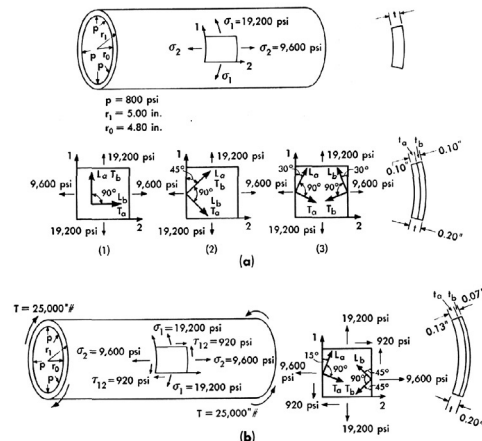
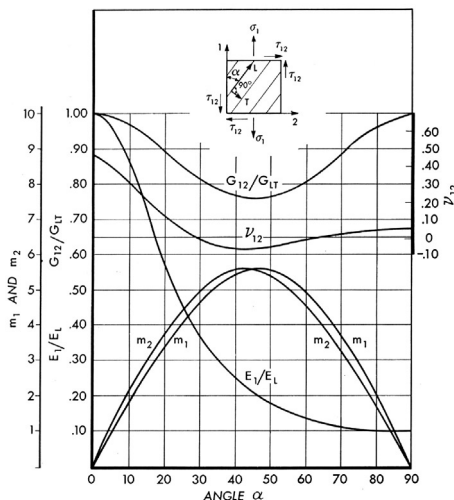


Chart VI. Fiberglass reinforced plastic thin-walled cylinder. (a) Internal pressure alone. (b) Internal pressure plus twisting moment.

3.2 Die Materialgeschichte des faserverstärkten Kunststoffes

Die Geschichte der Verwendung von faserverstärkten Kunststoffen für Tragwerke ist die Geschichte der Anwendung von glasfaserverstärktem Polyester. Mit ganz wenigen Ausnahmen wurde zwischen 1950 und 1980 nur GFK benutzt, da er für die hier besprochenen Anwendungen das beste Preis/Leistungsverhältnis aufweist. Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft über die Entdeckungen der Fasern und Matrizen, die zu einem Faserverbundwerkstoff vermischt werden können. Folglich steht seit 1942 glasfaserverstärktes Polyester in den USA zur Verfügung *Hufnagl (1997)*, in Deutschland seit 1950.

Grundlegende Eigenschaften für in der Luft- und Raumfahrt gebräuchlichen Kunststoffe lagen Mitte der 1950er Jahre vor, das Langzeitverhalten der Werkstoffe musste jedoch weitestgehend noch erforscht werden. Die erste umfassende Publikation zu Eigenschaften von FVK als auch Herstellungsmethoden bietet *Sonneborn (1954)* mit Beiträgen von Albert G.H. Dietz und Alton S. Heyser. Es kann demnach als gesichert gelten, dass man in den USA mit den Methoden der Herstellung soweit vertraut war und die technischen Ausrüstungen soweit vorhanden waren, dass für den Boots- und den Automobilbau in Serien große Teile aus FVK produziert werden konnten. Weiterhin legt das Buch den Schluss nahe, dass derartige Teile in der Folge auch für tragende Konstruktionen im Bauwesen Anwendung finden konnten. Das Buch war gedacht für den anwendenden Ingenieur ohne spezifische Fachkenntnisse in Chemie und Technologie und ist das erste seiner Art. Es wurde als Grundlagenwerk verstanden und findet sich in Publikationen verschiedener anwendender Ingenieure und Architekten, so in *Hintersdorf (1972)*. Das Kapitel 2 „Design Theory of reinforced plastics“ von Albert G.H. Dietz stellt erstmals in für den entwerfenden Ingenieur handhabbarer Weise die Beziehungen zwischen Harz und Faser und den sich daraus ergebenden Festigkeiten und E-Moduln anhand diverser Faser-Harz-Kombinationen dar (Abb. 64a). Isotrope (mattenverstärkte Konstruktionen) werden von orthotropen (gewebeverstärkten) und anisotropen (rovingverstärkten) Materialien unterschieden, die Richtungsbezogenheit der Festigkeiten und Moduln werden erläutert. Es werden auch Lamine, die aus verschiedenen Layern zusammengesetzt werden, also aus Schichten von jeweils mattenverstärktem, rovingverstärktem oder gewebeverstärktem Polyester, besprochen und somit erste Ansätze zur Laminattheorie geliefert *ebenda*, 188. Die Vorgehensweise für solche „Composite Plates“ wird am Beispiel einer Zylinderschale erläutert (Abb. 64b). Neben den einlagigen Kunststoffen hatten die Stützstoffkonstruktionen für Tragwerke eine wesentliche Bedeutung. Auch sie waren aus der Luft- und Raumfahrt bekannt. Im Kapitel 4.3.1 wird darauf näher eingegangen.

1907	Patent zur Herstellung von Phenolharzen an L.H. Baekland (Bakelit) Verstärkung von Holz-, Asbestfasern, Textilschnitzel und Woll- und Asbestgewebe (Ehrenstein 1992)
1910	Beginn der Produktion von Bakelit - belgischer Chemiker Leo Hendrik Baekland (1863-1944) Gründung der Bakelit-Gesellschaft in Berlin - Anfang der eigentlichen Kunststoffproduktion in Europa (Hufnagel 1997)
1928	- bei Röhm & Haas, Darmstadt (D) werden Polymethylacrylate entwickelt (PMMA) - Herstellung von Sicherheitsglas mit einpolymerisierter Polyacrylat-Zwischenschicht von O. Röhm (Hufnagel 1997)
1930	- Entwicklung des Polystyrol , Nutzung für Spielzeug, Verpackung und als Schaumstoff für Dämmung (http://www.apme.org)
1933	Entwicklung des Acrylglass , sofortiger Einsatz als Glasersatz in Flugzeugen des Militärs Carleton Ellis (US) erhält erstes Patent für ungesättigte Polyesterharze (Hufnagel 1997)
1935	Beginn der großtechnischen Herstellung von Glasfasern bei der Owens-Corning Fiberglas Corporation, USA (Ehrenstein 1992)
1937	- Produktion von ungesättigten Polyestern von Ellis-Förster (US) (Hufnagel 1997) - Patent von Bayer, Polyadditionsverfahren für Polyurethan (Hufnagel 1997)
1938	Entwicklung des Polyesterharzes - Fa. Ellis Foster Patent zur Herstellung von Epoxidharzen - P. Castan (Ehrenstein 1992)
1940	Produktion von Polyurethan (PUR) IG-Farben, Leverkusen (Hufnagel 1997)
1940	E.G. Rochow (US) entdeckt industrielles Syntheseverfahren für Silikone (Hufnagel 1997)
1942	technische Entwicklung von fiberglasverstärktem Polyester - US Rubber Company (Hufnagel 1997)
1943	erste Sandwichbauteile für Flugzeuge aus Glasfaser/Ungesättigte-Polyester-Laminaten als Deckschicht und Balsaholz als Kernmaterial (Ehrenstein 1992)
1945	Produktion von Wabenkernen (Honeycombs) - L.S. Meyer (Ehrenstein 1992) - Entwicklung des Faserwickelverfahrens G. Lubin und W. Greenberg (Ehrenstein 1992)
1947	Industrielle Produktion von Epoxidharzen (Hufnagel 1997)
1950	Produktionsbeginn von ungesättigten Polyestern (UP) in Deutschland (Hufnagel 1997)
1951	erstes Pultrusionspatent - Strangziehverfahren zur Herstellung von Profilen (Ehrenstein 1992) Anwendung von Polyätherpolyolen zur Herstellung von Schaumstoffen
1952	Erarbeitung der Grundlagen für technische Produktion von Polyurethanschaumstoff bei Bayer, Leverkusen bis 1954 (Hufnagel 1997)
1953	Cocooning –Spray-Technic spraybarer, schnell trocknender Vinyl Latex als erstes von Studenten und John Zerning, unter der Anleitung von Richard Baringer am Illinois Institute of Technology genutzt - Überbrücken von 0,8m Löchern - Schalungsherstellung für Hyparflächen Zerning (1976), 3; Saechtling (1973), Modern Plastics, Oktober 1953, Nr. 2, S. 93-95
1953	Hermann Schnell (D) erhält das Patent für Polycarbonat (Hufnagel 1997)
1956	technische Produktion von Polycarbonat (PC) , D
1959	Produktionsbeginn von Kohlenstofffasern , Fa. Union Carbide (Ehrenstein 1992)
1971	Produktionsbeginn von Aramidfasern , Fa. DuPont (Ehrenstein 1992)

3.3 Die Technikgeschichte des faserverstärkten Kunststoffes

3.3.1 Herstellung: Verarbeitungstechniken, Schalungstechniken

Die Zusammensetzung von Fasern und Harz in ihren Anteilen kann sehr unterschiedlich sein und ist wesentlich von der Herstellungsmethode abhängig.

Alle **Herstellungsverfahren** für faserverstärkte Kunststoffe sind explizit mit der Anwendung des Materiales im Bootsbau entstanden *Sonneborn (1954)*. Faserverstärkte Kunststoffe werden durch einen Härtingsprozess geformt. Die Zustandsänderung ist irreversibel. Der Härtingsprozess erfolgt in der Regel durch Druck und Temperatur. Die ungesättigten Polyesterharze für GFK erhärten auch bei Raumtemperatur und drucklos *Hintersdorf (1972), 41*

Unabdingbar für die Herstellung eines GFK-Bauteils ist demnach die Herstellung einer Schalungsform, die dem Bauteil die gewünschte Form gibt. Das Schalungsmaterial kann Holz, Gips, GFK oder Metall sein, je nachdem wie viele Stücke in dieser Form herzustellen sind. Bei Schalungen aus Gips sind ein bis drei Stück abnehmbar, bei Holz max. 50 Stück, bei GFK und Stahl sind die Stückzahlen quasi unbegrenzt.

Die Notwendigkeit einer Schalungsform zeigt die Nähe des Materials FVK zum Beton, der ebenso durch einen Härtingsprozess in einer Schalung geformt wird. Das Einbringen in diese Schalungsform sowie die Größen der Schalungen unterscheiden sich aber grundlegend. Da das Material FVK nur in Dicken von ca. 3-5 mm wirtschaftlich in einer Tragkonstruktion ist, sind die Schalungsoberflächen für den FVK exakter als für Beton herzustellen. Zudem sind wirtschaftlichste Formen für GFK kleinteilig, sodass sich ein Tragwerk aus FVK fast immer aus Einzelteilen zusammensetzt, während im Betonbau meistens vor Ort das gesamte Flächentragwerk eingeschalt wird.

Die Herstellungstechniken für glasfaserverstärkte Kunststoffe teilen sich in handwerkliche - also solche Verfahren, die ohne Anschaffung spezieller Maschinen möglich sind – und maschinelle Verfahren – für die Maschinen notwendig sind und die entsprechende Anschaffungskosten verursachen. Im Grenzbereich dieser beiden gibt es halbmaschinelle Verfahren. Prinzipiell zeichnen sich die handwerklichen Verfahren durch geringe Anschaffungskosten und beliebige Größen der Schalungsformen aus. Sie ermöglichen aber nur einen geringen Volumenanteil der Fasern. Da das Harz der teuerste Bestandteil des FVK ist und zudem die Kräfte durch die Fasern getragen werden, ist ein hoher Faseranteil erstrebenswert und ein Garant für hohe Festigkeiten und geringes Schrumpfverhalten. Hohe Faseranteile bei gleichzeitig dünnen Elementen werden nur mit maschinellen Verfahren erreicht. Die hohen Investitionskosten solcher maschineller Verfahren sind erst bei größeren Serien rentabel. Aus dieser Tatsache heraus sind fast alle Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen in der Zeit von 1950 bis 1980 entweder im handwerklichen Handauflege- oder im halbmaschinellen Verfahren hergestellt.

Das **Handauflegeverfahren** entwickelte sich aus der Klebetechnik des Furnierbaus für Flugzeuge und Leichtbauteile. Speziell für den Werkstoff GFK wurden das Wickelverfahren und das Pultrusionsverfahren (Strangpressverfahren) geschaffen. Sie sind jedoch auch für andere FVK anwendbar. 1945 erhielten G. Lubin und W. Greenberg das Patent für das Faserwickelverfahren *Ebrenstein (1992)*. Mit dem **Wickelverfahren** wurde die Basis für die wirtschaftliche Herstellung von Zylinderschalen geschaffen und so der Einzug dieser Konstruktionsform in den Ingenieurbau für Silos u. ä. geebnet. Das Verfahren wurde von *Schwabe (1/1973), 16* als überaus geeignet für eine Reihe anderer Anwendungen gepriesen: „das filament winding [...] hat den Vorzug sehr geringer Lohnkosten und relativ hoher Produktionsgeschwindigkeiten. [...] Die Anwendung für das Bauwesen ist darin denkbar, dass man den gewickelten Zylinder nach der Herstellung längs in 2 oder 3 Teile aufschneidet und damit Schalen erhält, die für Dächer oder Belichtung verwendet werden können.“ (Abb. 67)

Nachfolgend werden die verschiedenen Herstellungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffe erläutert. Als Quelle dienen *Hintersdorf (1972)*, *Saechtling (1973)*, *RG Katalog (2000/2001)*. Für das Verständnis der vorliegenden Arbeit ist eine intensive Auseinandersetzung mit den einzelnen Verfahren aus technologischer Sicht nicht nötig, sie kann aber an anderer Stelle durch eine weiterführende Arbeit gewiss neue Aspekte aufdecken.

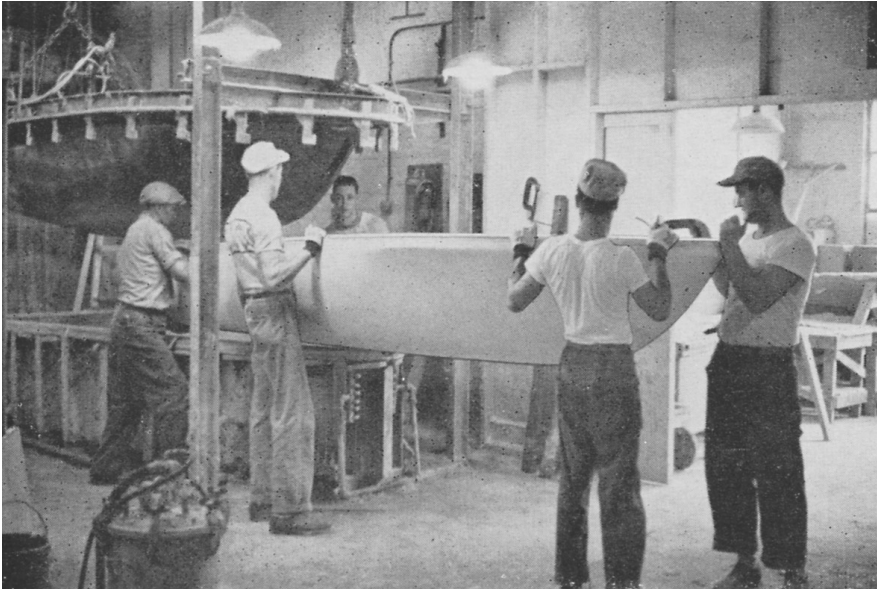


Abb. 65
Herstellungsverfahren für Tragwerke
aus FVK waren aus dem Bootsbau
bekannt
Sonneborn (1954), 71

1. handwerkliche und teilmaschinelle Verfahren

Handauflegeverfahren (Laminieren)

Mit dem Handauflegeverfahren lassen sich Formteile beliebiger Abmessung und Gestalt herstellen. Die Verstärkungsmaterialien (im wesentlichen Glasfasermatten und -gewebe) werden von Hand schichtweise in die vorbereitete Form eingelegt und mit Harz getränkt sowie mit Pinseln und Walzen bearbeitet. Das Laminat erhärtet drucklos. Es ergeben sich folgende technologische Parameter:

- Wanddickentoleranz bei $s = 2-3 \text{ mm}$: $\pm 0,4 \text{ mm}$
- Mindestradius $r_{\min} \geq 5 \text{ mm}$
- Seitenneigung 1:12,5 – 1:25
- Das Einlaminieren von Armierungs- oder Verbindungsteilen bereitet keine Schwierigkeiten
- Glasmassenanteil: Matte 20-30 %, Gewebe 40-60 %, Rovinggewebe 35-45 %
- Kalthärtung bei Raumtemperatur in 30 – 90 min, Nachhärtung in 5 h
- 3-3,5 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft

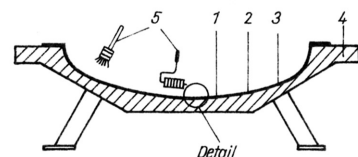


Abb. 66a Laminieren *Hintersdorf (1972), 84*
1 Erzeugnis
2 Gelcoat
3 Trennmittel
4 Form
5 Pinsel, Walze

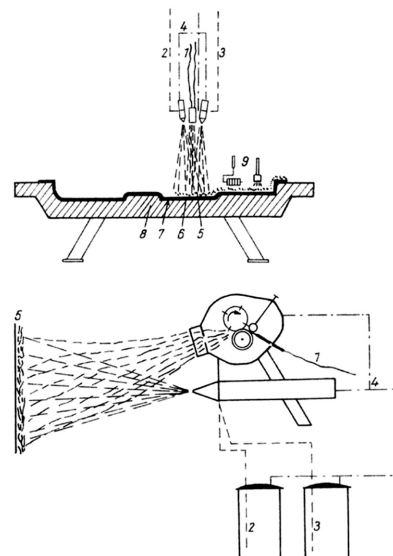
Das Verfahren ist geeignet für Musterbauten, Repräsentativbauten, Polyesterformenbau, großflächige Formteile. Vorteile sind die niedrigen Investitionskosten, Nachteile die relativ hohen Materialverluste und der zeitlich hohe Aufwand.

2. teilmaschinelle Verfahren

Faserspritzverfahren

Beim Faserspritzverfahren wird mittels einer Spritzanlage die Mischung aus geschnittenen Rovings und beschleunigtem Harz in eine vorbereitete Form gespritzt und anschließend wie beim Handlaminierverfahren mit Pinseln und Walzen bearbeitet. Das Laminat erhärtet drucklos. Es ergeben sich folgende technologische Parameter:

- Wanddickentoleranz bei $s = 3 \text{ mm}$: $\pm 0,5 \text{ mm}$, bei Änderung des Konturverlaufes ist mit Materialanhäufungen bis zu 3 mm zu rechnen
- Mindestradius $r_{\min, \text{innen}} \geq 10 \text{ mm}$, $r_{\min, \text{außen}} \geq 5 \text{ mm}$
- Seitenneigung 1:12,5 – 1:25
- Das Einlaminieren von Armierungs- oder Verbindungsteilen bereitet keine Schwierigkeiten
- Glasmassenanteil: 20-30 % Matte



- Kalthärtung bei Raumtemperatur in 30 – 90 min, Nachhärtung in 5 h
- 5 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Das Verfahren ist geeignet für Musterbau, Formenbau sowie Serienfertigung und ist ideal für stark sphärisch gekrümmte großflächige Formteile und Sonderkonstruktionen. Vorteile sind der höhere Mechanisierungsgrad gegenüber dem Handlaminieren bei Beibehaltung der gleichen Nachteile.

Abb. 66b Faser-Harz-Spritzverfahren

- 1 Roving
 - 2 Harz mit Beschleuniger
 - 3 Harz mit Katalysator
 - 4 Druckkraft
 - 5 aufgespritztes Laminat
 - 6 verdichtetes Laminat
 - 7 Trennmittel
 - 8 Form
 - 9 Laminierwerkzeuge
- Hintersdorf (1972), 86

Vakuumverfahren, Injektionsverfahren

Unter Injektionsverfahren versteht man die Herstellung maßhaltiger, beiderseits glatter mittelgroßer Formteile auf einer mindestens zweiseitigen, das Werkstück umschließenden Form. Zuerst wird das Verstärkungsmaterial in die Formteile gelegt, nach deren Schließen wird das Harz entweder durch Unterdruck in die Form gesaugt (Vakuumverfahren), oder mittels Druck injiziert (Injektionsverfahren). Es ergeben sich folgende technologische Parameter:

- beiderseits glatte Oberflächen
- Wanddickentoleranz bei $s = 3 \text{ mm}$: $\pm 0,5 \text{ mm}$
- Mindestradius $r_{\min} \geq 5 \text{ mm}$
- Seitenneigung 1:50
- Einlaminieren von Armierungs- oder Verbindungsteilen möglich
- Glasmassenanteil: 20-30 % Matte, 35-55% Gewebe
- Kalthärtung bei Raumtemperatur in 30 – 90 min, Nachhärtung in 5 h
- 6-8 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Das Verfahren ist geeignet für mittelgroße und großflächige Formteile mit Durchbrüchen und Einbettungen wie Rahmen und Schalen sowie für komplizierte Verbindungselemente und Erzeugnisse komplizierter Gestalt. Aufgrund der Anschaffung einer hydraulisch oder pneumatisch arbeitenden Presse kommt es nur in der Serienfertigung zur Anwendung (Kleinserien ab 100 Stück, Mittelserien ab 1000 Stück, Großserien ab 10.000 Stück).

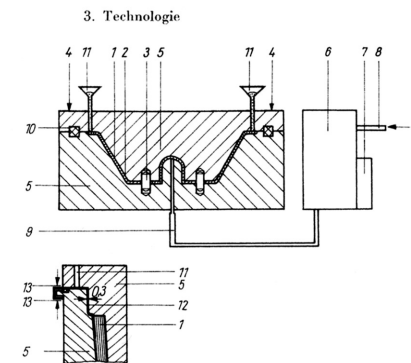


Abb. 66c Vakuumverfahren

- 1 Roving
 - 2 Harz mit Beschleuniger
 - 3 Harz mit Katalysator
 - 4 Druckkraft
 - 5 aufgespritztes Laminat
 - 6 verdichtetes Laminat
 - 7 Trennmittel
 - 8 Form
 - 9 Laminierwerkzeuge
- Hintersdorf (1972), 88

Blasverfahren

Leicht gewölbte Formteile können mit dem Blasverfahren hergestellt werden. Glasfasermatten werden mit drucklos kalthärtendem Harz zwischen zwei Folien imprägniert. Die Folien werden dann mit Druckluft aufgeblasen und härten so aus. Es entstehen beiderseits glatte, großflächige und dünnwandige Bauteile. Es ergeben sich folgende technologische Parameter:

- Wanddickentoleranz abhängig von der Gleichmäßigkeit der Matte
- Das Einlaminieren von Armierungs- oder Verbindungsteilen bereitet keine Schwierigkeiten
- Glasmassenanteil: 20-30 % Matte
- Kalthärtung, Wärmeeinwirkung kann die Härtung beschleunigen
- 3 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Das Verfahren ist ein spezielles Verfahren für ein- oder mehrschalige Oberlichtelemente. Niedrige Investitionen ermöglichen Serienfertigung sowie die Herstellung von Sondermaßen in kleinen Stückzahlen. Das Verfahren benötigt viel Platz.

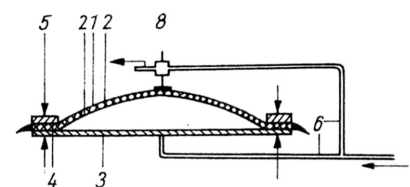


Abb. 66d Blasverfahren

- 1 Erzeugnis
 - 2 Folie
 - 3 Platte
 - 4 Spannrahmen
 - 5 Zuhaltung
 - 6 Druckluftleitung
 - 8 Ventil
 - 9 Laminierwerkzeuge
- Hintersdorf (1972), 88

3. Maschinelle Verfahren

Warmpressen

Es werden vorgefertigte Pressmassen aus Harz und Glasfasern, sog. Prepregs, in eine beheizte Stahlform unter Wärme eingepresst und verformt. Es sind exakte Formteile herstellbar, das Verfahren ist aufgrund der hohen Investitionskosten nur für Großserien ab 10.000 Stück geeignet. Es besitzt folgende technologische Parameter:

- Wanddickentoleranz 0,1- 0,3 %
- Mindestradius $r_{\min} \geq 5 \text{ mm}$
- Seitenneigung 5-15°
- Glasmassenanteil: 25 – 30 % Matte
- Warmhärtung 40-60 s/mm Wanddicke
- 15-20 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Kaltpressverfahren, Niederdruck-Pressverfahren

Beim Kaltpressverfahren werden Matten oder Gewebe in eine GFK-Pressform eingelegt und mit aktiviertem Harz aufgegossen und unter Einwirkung von Niederdruck in der Form gehärtet. Es kann für Klein- und Mittelserien und schalenförmige Elemente bis 5 m² angewandt werden. Gegenüber dem Handlaminieren hat es die Vorteile höherer Produktivität, besserer Qualität und höherer Festigkeiten durch höheren Glasgehalt sowie den Nachteil des höheren Investitionsaufwandes.

- Wanddickentoleranz bis 1,5 %
- Mindestradius $r_{\min} \geq 5 \text{ mm}$
- Seitenneigung 1:25
- Glasmassenanteil: Matte 25 – 45 %, Gewebe 50-60 %, Rovinggewebe 30-45 %
- Kalthärtung
- 10 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Wickelverfahren

Es werden rotationssymmetrische Hohlkörper hergestellt, indem man Faserstränge in einem Durchlaufbad mit Harz trinkt und anschließend unter Spannung auf einen rotierenden Kern wickelt. Sie härten auf dem Formkern aus. Es gibt verschiedene Wickeltechniken wie das Parallel- und Schraubenwickelverfahren oder das sphärische Wickeln für Hochdruckbehälter. Diese Verfahren verwendet man zur Herstellung von Behältern, Rohren, Zylindern, Silos, Tanks sowie Masten aller Größen. Es wird ein sehr hoher Glasfaseranteil erreicht. Durch Teilung dieser Formen können auch Oberlichter oder Halbschalenformen zur Überdeckung radialer Grundrisse entstehen (Abb. 67).

Abb. 67 filament winding:

4. Vorschlag zur Herstellung von zylindrischen Schalen aus GUP. Durch Halbierung werden einfache Schalen für Oberlichter gewonnen

5. Vorschlag zur kontinuierlichen Verlegung einer Längsbewehrung mit Rovingsträngen durch Gleitspulen. Damit könnten längsgespannte Tragelemente hergestellt werden

6. Herstellung von zylindrischen Schalen aus GUP. Durch Dreiteilung ergeben sich Flachschalen z.B. für ein Vordach

7. Mit filament winding für Kegelförmige lassen sich Flachschalen für runde Oberlichter gewinnen. Schwabe (1/1973), 16

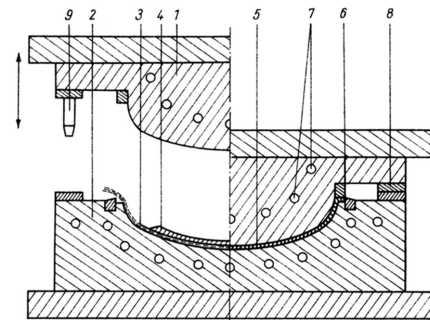
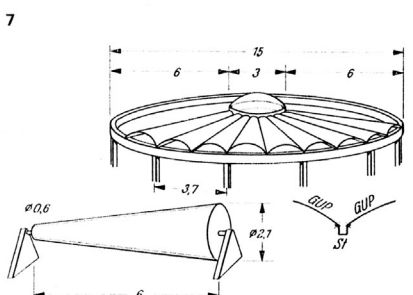
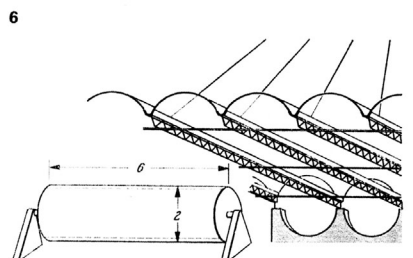
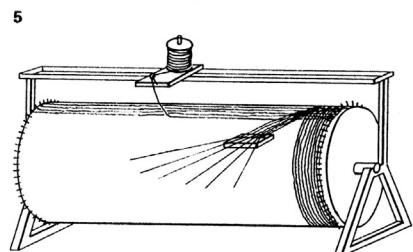
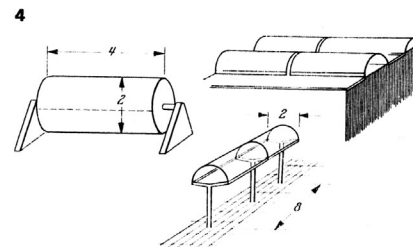


Abb. 66e Warmpressen mit Prepregs

- 1 Patrizie
- 2 Matrize
- 3 Vorformling (Preform)
- 4 Harz
- 5 Formteil
- 6 Quetschkante
- 7 Heizkanäle
- 8 Distanzstücke
- 9 Führungssäulen

Hintersdorf (1972), 92



- Glasmassenanteil: Rovings 65-75 %, Matte 30-40 %, Gewebe 40-60 %, Vlies 25 %
- Warmhärtung
- 20 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Strangpressverfahren (Pultrusion)

Es werden endlose, dickwandige Profile aus einer Strangpresse gefördert. Es entstehen stahlbauähnliche Profile, die als Abschlusselemente oder Balken verwendet werden.

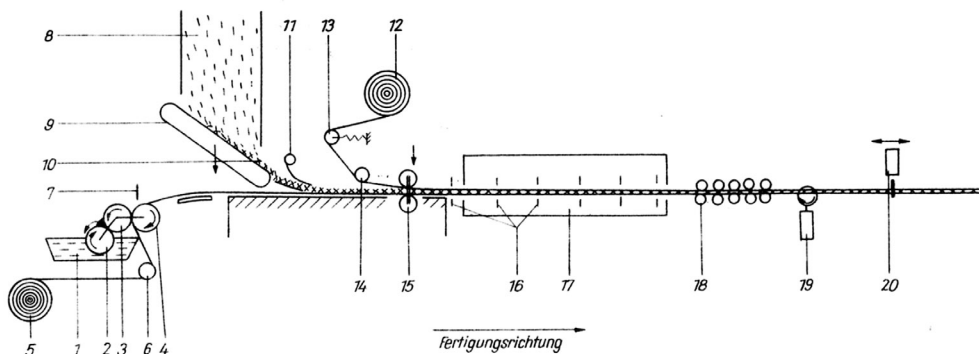
Plattenlaminierverfahren

Mit diesem Verfahren werden ebene oder gewellte GFK-Platten kontinuierlich hergestellt. Über eine automatische Dosier- und Mischvorrichtung gelangt das Harzgemisch fortlaufend über Rollen auf eine Härtestrecke, wo es unter Wärmeeinwirkung aushärtet und anschließend geschnitten wird. Dieses hochmaschinelle Verfahren von hoher Produktivität eignet sich zur Massenfertigung von Plattenelementen. Es hat entsprechend höchste Investitionskosten

- Glasmassenanteil: Roving, Matten 25 %
- Warmhärtung
- 100 kg Fertigerzeugnis / h und Arbeitskraft (1972)

Abb. 68 Plattenlaminierverfahren

1 UP-Harz; 2 Entnahmewalze; 3 Grobdosierwalze; 4 Aufnahmewalze; 5 Unterfolie; 6 Führungsrolle; 7 Rakel für Feindosierung; 8 Wirbelkammer des Mattenteils; 9 Kettenband des Mattenteils; 10 gebildete Matte (ohne Mattenbinder); 11 Niederhalter; 12 Oberfolie; 13 Führungs- und Spannrolle; 14 Zulaufrolle zur Vermeidung der Faltenbildung der Folie; 15 Druckwalzenpaar; 16 Formstrecke; 17 Härtezone; 18 Abzugeinrichtung (Gummiwalzen); 19 Besäüeinrichtung; 20 Ablängeeinrichtung
Hintersdorf (1972), 98



Herstellung von Stützkernkonstruktionen

Einen umfassenden Überblick über die möglichen Verfahren zur Herstellung von Stützkernkonstruktionen gibt Hoppe in Hoppe (1963). Prinzipiell unterscheidet man zwei Verfahren. Beim „Beschichtungsverfahren“ werden die vorgefertigten Kernlagen mit den Deckschichten durch einen von außen wirkenden Druck verbunden. Beim „Ausschäumverfahren“ oder der „Füllbauweise“ wird eine vorgefertigte Hohlkonstruktion ausgeschäumt. Für beide Verfahren gibt es sowohl handwerkliche als auch maschinelle Methoden. Dem Plattenlaminierverfahren ähnlich und für die Massenproduktion von Sandwichplatten gedacht ist das kontinuierliche Beschichtungsverfahren nach Abb. 69.

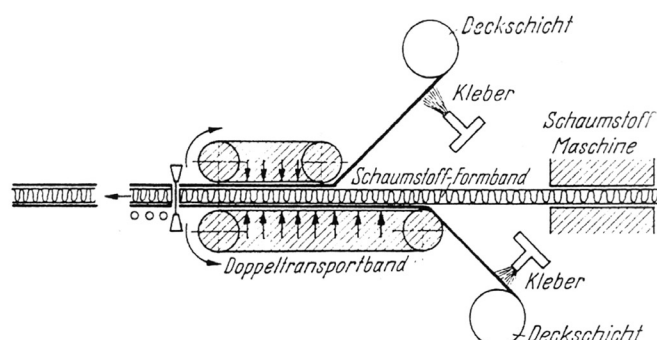


Abb. 69 schematische Darstellung einer vollkontinuierlichen Anlage für Beschichtung zur Herstellung von Sandwich-Halbfabrikaten Hoppe (1963), 771

Zusammenfassung:

Mit fast 20jähriger Erfahrung mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren fasst *Schwabe (1977)*, 100 den entscheidenden Einfluss des Produktionsverfahrens zusammen.

„Neben den Materialkosten sind die Fertigungskosten der zweite entscheidende Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit. Für die Wahl des Produktionsverfahrens sind Abmessungen und Stückzahlen ausschlaggebend. [...] Die im folgenden genannten Verfahren stellen den heutigen Stand dar,[...] Zur Verfügung stehen folgende Verfahren:“

Verfahren	Formenbau	Stückzahlen*	Bemerkungen
Handauflege-	1 Schalung	bis 400	Lohnintensiv, nur 1 glatte Oberfläche
Handeinlege- mit Harzinjektion	2 leichte Schalungen	bis 1000	arbeitsparend, umweltfreundlich, 2 glatte Oberflächen
Faserspritzen	1 Schalung	bis 400	Schutzkabine erforderlich, nur 1 glatte Oberfläche
Kaltpressen	Presse, 2 Formen	400–3000	} nur für kleinere Teile Höchstgrenze 4 m ² 2 glatte Oberflächen
Heißpressen	Presse, 2 Formen	ab 3000	
Spritzpressen	Presse, 2 Formen		
Kont. Imprägnierung	Anlage		nur kleinere Teile
Pultrusion	Ziehform		Spezialverfahren für glatte und Profilplatten Profil, lineare Bauteile
filament winding	Anlage ggf. Holzkern		Rohre und Hohlkörper lohnsparend

* Durchschnittszahlen für kleinere Teile, die Werte hängen sehr stark von den Abmessungen ab

Schwabe, pc (3/1977), 100

Stückzahlen unter 400 sind demnach allein durch Handauflegeverfahren realisierbar. Die Mehrzahl der GFK-Elemente wurden mit dem Handauflegeverfahren erzeugt. Dies liegt größtenteils an der geringen Stückzahl der Elemente, bis zu 1000 Stück sind in dieser Technik rentabel herzustellen. Das Verfahren ist an keinen Ort gebunden, Heinz Isler errichtete beispielsweise für die Herstellung der Platte für die Tankstelle Thun ein temporäres Zelt. Von den teilmaschinellen Verfahren fand das Faserspritzverfahren die größte Verbreitung in Frankreich. Die uns bekannten Abbildungen, z.B. von der Herstellung des Bulle Six Coque, zeigen dieses Verfahren. Das gut für kleinere bis mittlere Serien geeignete Injektionsverfahren wurde angewendet bei allen geodätischen Kuppeln und Radomen *Dietz (1955)*, 98. Auch Renzo Piano wendete das Verfahren für die Schwefelanlage in Pomezia sowie für das zugbeanspruchte Tragwerk in Genua an *Compagno (1991)*. Das Verfahren gewährleistet gleichbleibende hohe Qualität bei hohem Faseranteil. Piano stellte damit besonders leistungsfähige Tragwerke mit geringen Eigengewichten her ($g=0,04 \text{ kN/m}^2$). Das Wickelverfahren ist für Silos und Behälterformen sowie für Oberlichter und Halbröhrenformen effektiv und günstig. Es wurde seit 1945 bis heute angewandt. Die mit filament winding hergestellten Tragwerke können als die am billigsten herzustellenden gelten. Beispiele sind die doppelt gekrümmten Schalen für die Kläranlage von Heinz Isler (1956) sowie aus der Tragwerkskategorie der Boxen die Montazni-Relaisstation (1965), die GFG Zelle (1970) und die biegebeanspruchte Schale der Transstar Villa (1969). Mit diesem Verfahren lassen sich auch architektonisch herausragende Tragwerksformen erzeugen, wie die Markthallen von Stephane Du Château. Mit dem noch effektiveren, für massenhafte Plattenherstellung geeigneten Plattenlaminierverfahren lassen sich nur rechtwinklige Raumformen erzeugen.

3.3.2 Herstellung: Füge-techniken

Tragwerke aus FVK, insbesondere Flächentragwerke, müssen in der Regel aus mehreren Einzelteilen gefügt werden. Das ergibt sich aus

1. der Tatsache, dass die Bauteile unter Werkstattbedingungen herzustellen sind,
2. die Bauteile somit transportgerecht sein müssen,
3. die Bauteile vor Ort einfach ohne Werkstattbedingungen gefügt werden müssen, Klebungen somit ausgeschlossen sind,
4. die Gebäude meistens mobil und somit demontierbar sein sollen.

Dem Fügen von Einzelteilen aus GFK zu Tragwerken kommt entsprechend eine besondere Bedeutung zu. Aus herstellungstechnischen Gründen besitzen die einzelnen Bauteile eine Fläche von max. 5 m². Jedes Tragwerk mittlerer bis größerer Spannweite ist somit aus einer Mehrzahl von Elementen gefügt. Bei den bevorzugten Tragwerken aus GFK handelt es sich um flächige Tragwerke, die ihre Lasten in der Mittelfläche über Membranspannungen abtragen. Je nach Art der Fügung werden diese Membranspannungen aus ihrer Mittelfläche aber abgelenkt bzw. werden sie aus der Fläche heraus in einem Punkt konzentriert zusammengefasst, sodass sich das Tragverhalten an diesen Fügungsstellen gegenüber dem ungestörten Lastabtragungsverhalten erheblich ändert. Welche Verbindungsmöglichkeiten den Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen angemessen sind, damit befasst sich eine Arbeit von Stefan Linne am gleichen Forschungsbereich FOMEKK der Bauhaus-Universität Weimar *Linne (Diss. in Bearbeitung)*. Es soll daher in dieser Arbeit ausschließlich auf die Geschichte der Fügungstechnik für Tragwerke aus GFK während der Jahre 1950 bis 1980 anhand von gebauten Beispielen eingegangen werden. Detaillierte Untersuchungen bleiben der Arbeit von Stefan Linne vorbehalten.

Auf die Besonderheiten der Fügung von Tragwerken aus Elementen mit FVK wird bereits in *Sonneborn (1954)*, 92 hingewiesen. Im Unterschied zu Metallen besitzt FVK eine weitaus geringere Scherfestigkeit und Auflagerfestigkeit. Außerdem besitzt das Laminat die Tendenz zur Delamination unter abreißen und abschälenden Spannungen. Empfohlen werden Klebverbindungen (Bonded Joints) und Nietverbindungen (Riveting).

Prinzipiell finden sich kaum Veröffentlichungen zu Fügungen, und zwar weder zu Klebungen, noch zu Bolzenverbindungen. Neben *Sonneborn (1954)*, 92 und *Hintersdorf (1972)*, 174, die sich allgemein zu Verbindungen äußern, geben *Hütter (1966)* und *Conen (1966)* Angaben zu Schlaufenverbindungen, die jedoch nur für zugbeanspruchte Verbindungen geeignet sind. Die nachfolgend unter den einzelnen Verbindungsarten genannten Schriften sind, gemessen an den Veröffentlichungen zu tragenden FVK, im allgemeinen dürftig. So ist es nicht verwunderlich, wenn viele Konstrukteure auf die manuell gut beherrschbare Technik der Bolzenverbindung zurückgriffen, obwohl auch für diese kaum zugänglichen Erkenntnisse zu Bolzen- und Randabständen, Scher- und Lochleibungsspannungen vorlagen. Bolzen- und Schraubenverbindungen waren einfach herzustellen. Da sie lösbare Verbindungen sind, tragen sie dem Gedanken des mobilen Bauens Rechnung. Genau aus diesem Grunde wurden Verklebungen oft vermieden, obwohl diese Verbindungsart durch ihre flächige Lastübertragung für das Verbinden von Bauteilen aus GFK geeigneter ist als die Bolzenverbindung. Eine Zwischenlösung stellt die Schnapp- oder Klemmverbindungen dar. Wie bei Bolzen handelt es sich um punktuelle und lösbare Verbindungen, jedoch mit größeren Lastübertragungsflächen, da die Spannschlösser mit den GFK-Laminaten verklebt werden.

a) Stoffschlüssige Verbindungen

Stoffschlüssige Verbindungen sind nichtlösbare Verbindungen. Sie gelten für Bauteile aus FVK als materialgerecht infolge ihrer kontinuierlichen Kraftübertragung. Während der Pionierphase wurden sie kaum angewandt.

1. Klebeverbindungen

Verklebungen von schalenförmigen Strukturen aus FVK unterscheiden sich prinzipiell nicht von denen mit Blechen: dünne steife Platten sind mit dünner nachgiebiger Kunststoffklebeschicht miteinander verbunden. Die vereinfachte Betrachtung der mechanischen Beanspruchung geht davon aus, dass die Füge-teile im wesentlichen auf Zug und Druck, der nachgiebige Kleber dagegen auf Schub beansprucht wird (Abb. 74).

Hintersdorf (1972), 174 bezeichnet Klebeverbindungen als bauweisengerechte Verbindung für Plastkonstruktionen. Die Verbin-

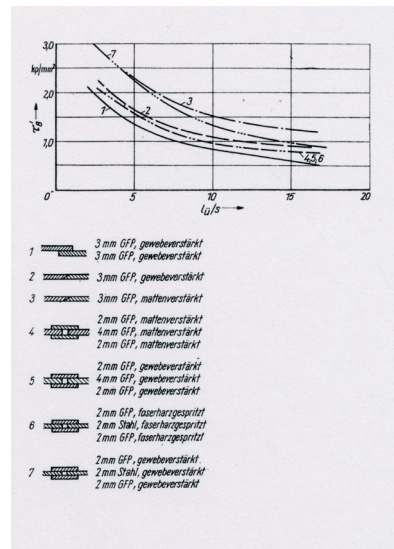
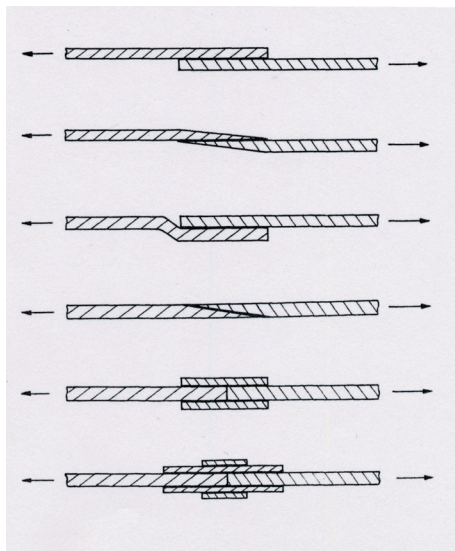


Abb. 70 (links)
gebräuchliche Klebeverbindungen von Teilen aus GFK nach

Hintersdorf (1972), 175

Abb. 71

Zugshearfestigkeiten von Klebeverbindungen mit GFK-Laminaten nach Hintersdorf (1972), 176

dungsformen sind überlappte oder geschäftete Verbindungen, wie in Abb. 70 dargestellt. Im Gegensatz zu Klebeverbindungen unter Metallen ist der Einfluss der Klebfugendicke bei GFK-GFK-Verbindungen und GFK-Metall-Verbindungen wesentlich geringer. Hintersdorf beruft sich auf die Aussagen von *Schapitz* (1951) – ein Flugzeugkonstrukteur, der ausführlich die Krafteinleitungsprobleme im Leichtbau behandelt, allerdings keine Verbindungen im einzelnen, also auch keine Klebeverbindungen untersucht, und auf *Meckelburg* (1964), der sich zum Kleben als Fügeverfahren äußert. Umfangreiche Messungen zwischen 1960 und 1967 haben die in Abb. 71 zusammengestellten Zugfestigkeiten für diverse Klebeverbindungen ergeben.

Es lässt sich somit zusammenfassend sagen, dass bereits seit 1951 umfängliche Aussagen zu Krafteinleitungsproblemen vorlagen, zu Klebeverbindungen mit FVK jedoch erst seit Beginn der 60er Jahre. Sie wurden in den 60er Jahren weiter detailliert.

1.1 Klebungen von GFK zu GFK

Ein exzellentes Beispiel für Verklebungen von GFK-Teilen ist die von Renzo Piano realisierte Schalenstruktur für die XIV. Triennale in Mailand 1967. *Compagno* (1991), 66 spricht zwar im Zusammenhang mit dieser Schalenkonstruktion vom „chemischen Schweißen mittels Polyesterharz“, die Elemente für die Schale sind jedoch im Faserspritzverfahren aus Glasfasern und Polyester hergestellt, eine Verschweißung im Sinne einer Vulkanisierung des Materials, also eines Aufschmelzens der Oberfläche kann hier nicht gemeint sein, vielmehr handelt es sich um ein Kleben mittels Harz-Pistole, wie man an Abb. 72 und 73 sieht. Es werden scheinbar die Stirnflächen der Sandwichelemente verbunden, die Ränder der Elemente sind aber so durch Einkerbung vorbereitet, dass die Klebefuge wie eine Art Pflaster oberkantenbündig eingebracht werden kann.

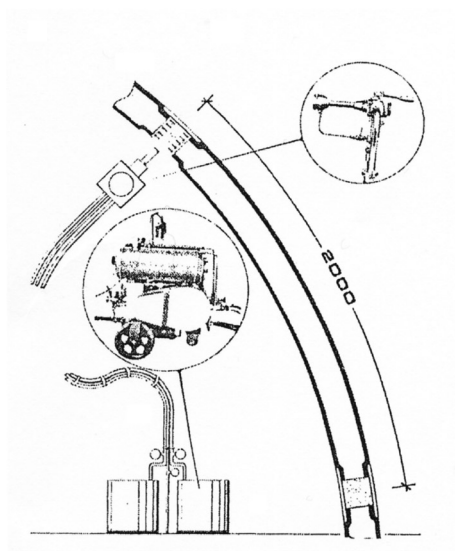


Abb. 72 (links) und 73

angewandte Klebeverbindungen von Schalelementen aus GFK, Konstruktionssystem einer Schale für die Triennale in Mailand von Renzo Piano

1.2 Klebungen von GFK mit anderen Materialien

Beim Verkleben von Füge­teilen mit unterschiedlichem E-Modul sind die Spannungsspitzen um so größer, je steifer die Füge­teile sind. Abb. 74 zeigt, dass bei Metall-GFK-Verbindungen die Spannungen am Ansatz des metallischen Füge­teils am größten sind, wobei diese Spannung auch vom GFK aufgenommen werden muss.

Klebungen von GFK mit metallischen Teilen wurden dort angewandt, wo tragende Strukturen aus flächigen GFK-Elementen und metallischen, meist stabförmigen Elementen unlösbar zusammengesetzt wurden. Durch das Verkleben tragen die beiden Werkstoffe in der Tragstruktur gemeinsam.

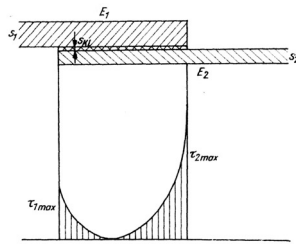
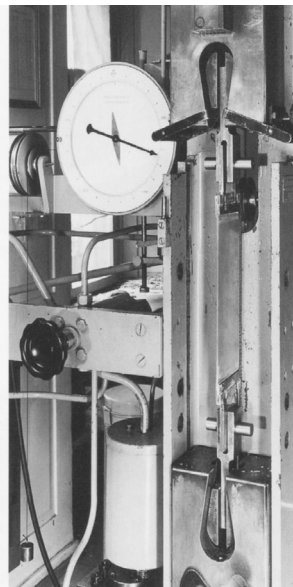
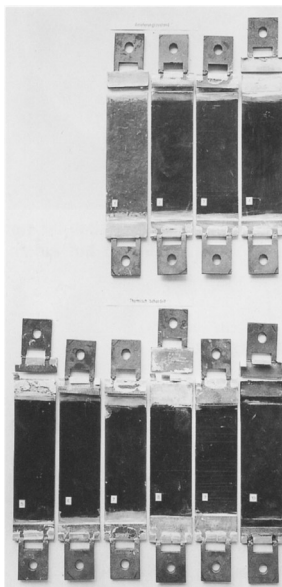


Abb. 74
Schubspannungsverlauf in der Klebefuge bei der Verklebung von Werkstoffen mit unterschiedlichem E-Modul nach Hintersdorf (1972), 177

Ein herausragendes Beispiel für eine solche Konstruktion ist der Pavillon für die Expo '64 in Lausanne, entworfen von Heinz Hossdorf. Hier sollten die Polyesterschirme mit der stählernen Randverstärkung zu einer monolithischen Einheit verbunden werden. Hossdorf sagt, dass das Tragverhalten der beiden Materialien miteinander nicht ohne Versuche beschrieben werden kann. Die zu überwindenden Probleme beschreibt er folgendermaßen:

„Vom direkten Einlaminieren – wie vorerst vorgesehen – der nassen Kunststoffmatten auf die mit einer Verkrallungsmöglichkeit versehenen Stahlprofile musste wegen des Schwindens des Harzes bei der Polymerisierung verzichtet werden. Die Rahmen hätten sich verzogen und ihre für den späteren Zusammenbau erforderliche Masshaltigkeit verloren. Auch die trockene Verbindung durch Schrauben oder Nieten wurde wegen des spröden Bruchverhaltens des GFK ausgeschlossen. Es blieb nur die Verklebung der auspolymerisierten Membrane mit den Stahlprofilen. Deren Zuverlässigkeit hängt aber, wie erste Vorversuche erwiesen, entscheidend von der mechanischen Aufbereitung der metallenen Oberflächen ab. Außerdem stellte sich die Frage nach den Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Materialien. In der Folge wurden an der EMPA unter Verwendung unterschiedlicher Klebstoffe am Ausführungsdetail der Verbindung nachgebildete Probekörper Zerreißversuchen unterworfen. Die Experimente wurden in einem Temperaturbereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durchgeführt und erbrachten denn auch die erhofften Ergebnisse.“ Hossdorf (2003), 64

Als Verbinder wurde ein von der Firma CIBA gelieferter Aralditkleber unter Druck auf das sandgestrahltes Flacheisen geklebt Hossdorf (1963), S. 23.



Skizze und Abmessungen

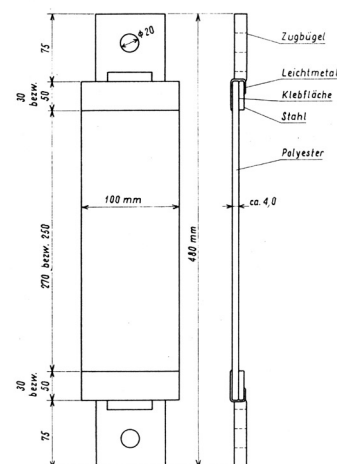


Abb. 75, 76
Versuchsanordnung und Lage der Bruchstellen für die Schirme der Expo '64 in Lausanne nach Hossdorf (1963), 26 und Hossdorf (1963), 64

1.3 Klebungen von GFK in Stützkernkonstruktionen

„Stützstoffkonstruktionen sind nur dann möglich, wenn der Stützstoff einwandfrei mit den Deckschichten verbunden werden kann. [...] Die Verbindung erfolgt vorwiegend durch Kleben, seltener durch Schweißen oder Löten.“ *Hintersdorf (1965), 31* Für Stützkernkonstruktionen mit Deckschichten aus glasfaserverstärktem Polyester werden, unabhängig von Art und Beschaffenheit des Stützstoffes, warmhärtende Polyester als Klebharze verwendet. Deckschicht und Klebstoff sind demnach in der chemischen Zusammensetzung weitgehend gleich. Die Klebschichtdicke beträgt 0,1 bis 0,2 mm. Neben Polyesterharz können auch Polyurethanharze, Acrylatharze oder Phenolharze als Kleber fungieren *Saechtling (1973)*.

Klebharz und Oberflächen müssen besonders beschaffen sein, um sich zu verbinden. Hinweise dazu finden sich in *Hintersdorf (1965), 31*. Wurden Stützkernkonstruktionen im handwerklichen Verfahren hergestellt, so war die Zuverlässigkeit der Verbindung ein bekanntes Problem.

Anzuführen ist hier beispielweise das Protokoll für das 1971 herzustellende Rondo der *Firma König (Dietikon) (3. August 1971)*. Dokumentiert werden darin das in allen Tests beobachtete Versagen der Klebefuge vor dem Bauteilversagen. Die Erhöhung der Reibungsbeiwerte zwischen Deckschicht und Schaum wurde als dringend erforderlich ausgewiesen. Das Problem konnte gelöst werden durch Erhöhung der Rauigkeit der Deckschicht. Beidseitig vom PUR-Kern ordnete man raue bandförmige Einlagen an.

Auch Heinz Isler bemerkt zu seiner Herstellungsmethode für die Sandwichplatte des Wochenendhauses 1959 „Wir hatten die Rechnung ohne die Bodenunebenheiten und ohne den Verzug des ersten Teilstückes gemacht. Trotz intensiver Belastung bekamen nur etwa 30 % der Stege Kontakt und Verschweissung. In einer großen Geduldsarbeit mussten die fehlenden Nähte durch Handlöcher in jedem zweiten Kassettenfeld nachgeholt werden.“ *Isler (1975), 6* Isler verbesserte seine Herstellungstechnik daraufhin bei der großen Stützkernplatte für die Tankstelle in Thun (Abb. 77, 78)



Abb. 77 (links) und 78
Tankstellenüberdachung in Thun von Heinz Isler mit verbesserter Herstellungstechnik für eine Stützkernkonstruktion
Isler (1975)

2. Schweißverbindungen

Bei den Schweißverbindungen handelt es sich um unlösbare Verbindungen, bei der die Oberflächen im Gegensatz zum Kleben verändert werden, sie werden aufgeschmolzen. Für Duroplaste, wozu GFK zählt, ist es nicht anwendbar, da Duroplaste nicht aufschmelzbar sind. Anwendbar ist es für Thermoplaste, auch faserverstärkte, aus denen in der Regel keine Tragwerke gemacht wurden. Auf Schweißen wird daher nicht weiter eingegangen.

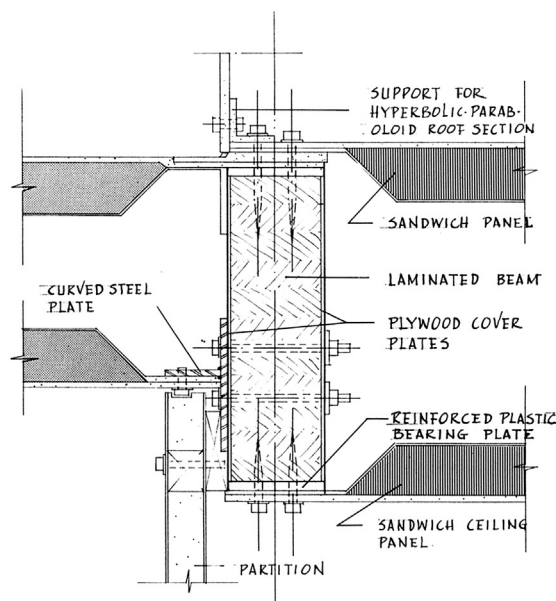
b) Formschlüssige Verbindungen

3. Bolzen, Niet- oder Durchsteckverbindungen

Bolzen- und Nietverbindungen wurden schon früh angewendet. Albert G. H. Dietz gibt in *Sonneborn (1954)*, 94 Randabstände für drei verschiedene Bolzendurchmesser (28, 38, 47 mm) in Abhängigkeit von der Laminatdicke an. Art und Richtung der Faserverstärkung bleiben unberücksichtigt. Der Randabstand beträgt für alle Bolzendurchmesser (D) und Laminatdicken 2,5 bis 3 D . In einer weiteren Tabelle werden die Einsenktiefen von Bolzen angegeben. Für den kleinsten Bolzendurchmesser 28,5 mm betragen sie mindestens 18 mm.

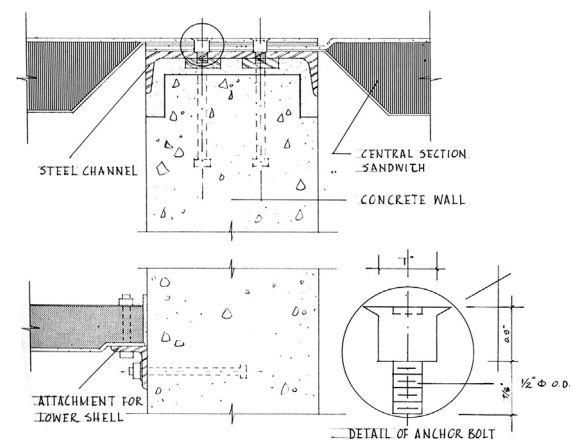
Vielfache Untersuchungen zu Bolzen, die FVK-Teile verbinden, wurden für das erste Kunststoff-Wohnhaus, das Monsanto House of the Future, angefertigt. Im zusammenfassenden Final Report berichtet *Dietz (1957a)*, 57 darüber. Die einzelnen schalenförmigen Elemente mit aufstehendem Rand wurden mit 12,5 mm Bolzendurchmesser bei einem Randabstand von 50 mm, also größer als 3 D gefügt. Die Lochleibungsspannung ist entsprechend gering und lastet das Material nicht voll aus. An Stellen großer Kraftübertragung wurden die Bolzenverbindungen nicht am aufgekanteten Rand, sondern am überlappenden Rand ausgeführt. Abb. 79 und 80 zeigt die Anbindung der auskragenden Flügel und die Übertragung von Zugkräften auf den Kern.

Bolzenverbindungen am überlappenden Rand sind seltener ausgeführt worden als solche mit Randaufkantung. Das Lochleibungsverhalten des Materials unterscheidet sich dabei nicht. Positiv bei überlappenden Stegen sind neben dem formalen Argument der glatten Oberfläche die vermiedene Umlenkung der Kräfte in den Steg.



Bolzenverbindungen mit überlappendem Steg beim Monsanto House
Abb. 79 (links) Die Verbindungsstelle entspricht dem Detail AD1 aus dem Schnitt im Anhang A7

Abb. 80 (rechts) Die Verbindungsstelle entspricht dem Detail AD2 aus dem Schnitt im Anhang A7 *Dietz (1957a)*, 50



Beispiele für **Bolzenverbindungen mit Randaufkantung** lassen sich viele finden. *Polónyi (1969)*, 25 bemerkt zur Unzulänglichkeit dieser Verbindung „Das Verbinden der Einzelteile ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Man greift immer wieder auf die altbewährte Schraub- oder Nietverbindung zurück, und zwar mittels einer Aufbördelung, an der die Teile zusammengeschraubt werden. Um keinen engen Schraubenabstand zu bekommen, wird die Aufbördelung stärker ausgebildet, z.B. mit einlaminierter Bandstahl.“ (Abb. 81)

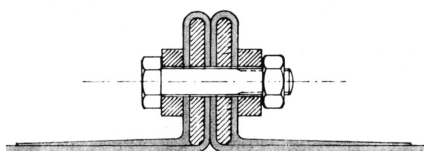
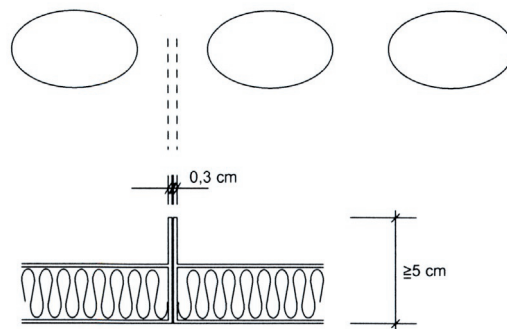
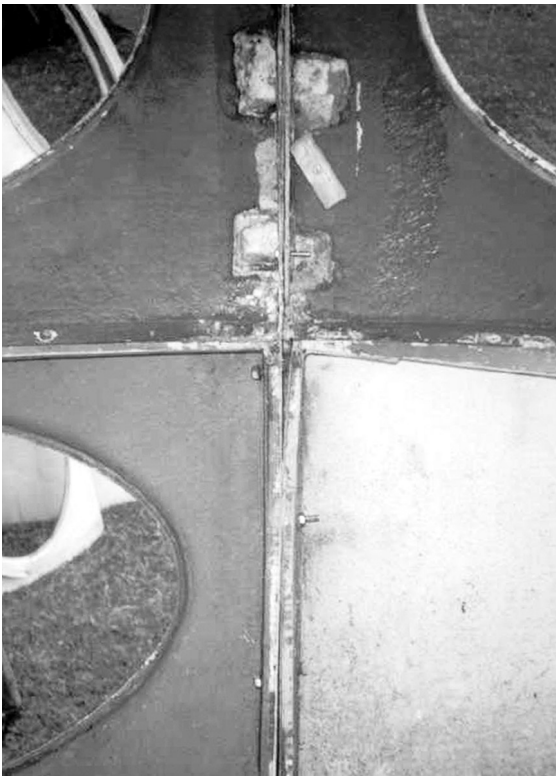
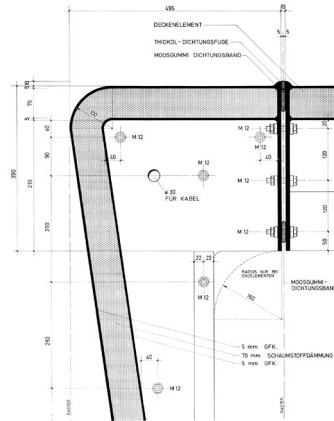


Abb. 81

Bolzenverbindungen mit Randaufkantung waren die am häufigsten angewandte Verbindung von Tragelementen aus FVK *Polónyi (1969)*, 25

Polónyi verwendete sie bei seiner Rippenschale der Kugelpavillons für Brasilien (Abb. 33)

Ebenso gebräuchlich war die Verdickung der Randaufkantung gegenüber der Plattendicke und dessen Verstärkung durch Rovingfasern. Nachweisbar ist dies für das fg 2000 (TOdT 4.2.1.2-1968/01), Abb. 83 oben rechts, für das Bulle Six Coque (TOdT 4.3.2.6-1967/02), Abb. 82 oben links, für das Futuro (TOdT 4.3.2.2-1968/03), Abb. 84 bis 86. Aber auch manche Fly's Eye wurden mit Aufkantung gefügt, Abb. 88.



Verbindungen mit Randaufkantung:

Abb. 82 (oben links): Bulle Six Coque (im Katalog ist unter dem Projekt Bulle Six Coque in einer Übersichtszeichnung die Verbindungsstelle markiert)

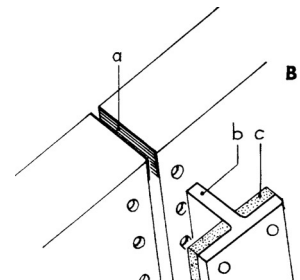
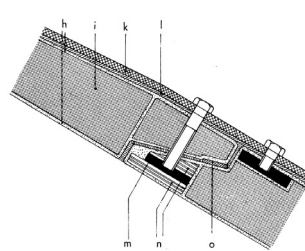
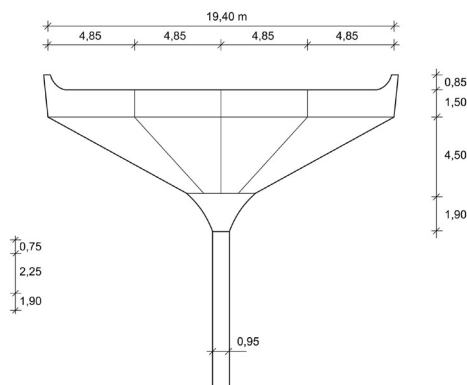
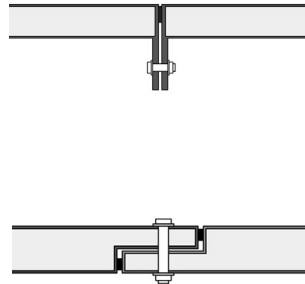
Abb. 83 (oben rechts): fg 2000 *Feierbach* (1970) (Verbindungsstelle ist im Katalog an einer Übersichtszeichnung markiert)

Abb. 84 (unten links) und Abb. 86 (unten rechts) Futuro Nr. 013: Verbindung der Schalenteile mit Randaufkantung $h = 5\text{ cm}$ und Bolzen

Abb. 85 (mitte rechts) Futuro Nr. 013: die in Abb. 84 dargestellte Verbindung wird im Endzustand unter einer Abdeckschiene aus GFK verdeckt

Fomekke (2004)

Als Beispiele für **Bolzenverbindungen mit überlappendem Steg** lassen sich die Monohex-Strukturen von Buckminster Fuller (1965) anführen (Abb. 87). Auch Teile des Wohnhauses Rondo (1969) wurden überlappend gefügt (Anhang A27). Ein anderes Beispiel sind die Schirme des Flughafens von Dubai (1971) (Abb. 89-91), wobei sich an diesem Projekt eine weitere seltene Verbindungsart konstatieren lässt, die Verbindung über ein durchlaufendes zusätzliches Element, hier ein T-Träger. Diese Verbindung ist den Schnappverbindungen und den Verbindungen mit überlappendem Steg ähnlich, da sie die Kräfte nicht umlenkt sowie eine größere Fläche zur Lastübertragung bereithält.



Verbindungen über überlappendem Steg:

Abb. 87 und 88 (oben links und oben rechts): die Fly'e Eyes von R. Buckminster Fuller wurden sowohl mit Randaufkantung als auch überlappend gefügt

Estate of R. Buckminster Fuller

Abb. 89 bis 91: Flughafen Dubai *Empfangsgebäude* (1972)

(Verbindungsstellen sind im Katalog an einer Übersichtszeichnung markiert)

4. Schnappverbindungen

Schnappverbindungen oder Spannschlösser waren in der Pionierphase des Kunststoffbaus keine gebräuchliche Verbindungstechnik. Allein *Scheichenbauer* (1974), 4 berichtet über Wandelemente des System Ponza (1971), die durch Stahlspanner zusammengefügt werden. Mit Schnappverbindern lassen sich Tragwerksteile leicht und schnell verbinden, sie sind daher geeignet für Gebäude aus vorgefertigten Teilen, die in kürzester Zeit an einem unwegsamen Ort aufgebaut werden müssen. Als Beispiel ist der Polar-Iglu (TODT 4.3.2.2-1959/02) anzuführen, in Frankreich für Grönland erdacht, dessen Schalen mittels Schnellverbindern gefügt wurden *Dufflos* (1961), 783.

5. Schlaufen

Schlaufenverbindungen wurden als Verbindung für Tragwerke praktisch nicht verwendet. Aufgrund ihrer Eignung für zugbeanspruchte Verbindung fanden sie eingehend Verwendung bei Zeltkonstruktionen sowie bei allen Tragwerken mit Seilen. Ebenso wurden sie im Flugzeugbau angewendet. Der Rotorblattanschluss eines Hubschraubers ist eine typische Schlaufenverbindung.

4. Die Tragwerke

Welche Tragwerke entwickelten sich mit dem Gebrauch faserverstärkter Kunststoffe? Unterscheiden sie sich in Form oder Lastabtrag von den Tragwerken aus anderen Materialien? Um diese Frage zu klären, ist es vorab nötig, eine Tragwerksordnung, eine Typologie zu erstellen.

4.1 Begriffe und Tragwerkstypologie

Die Frage der Systematik von Tragwerken wird vielfach unterschiedlich betrachtet. Allen Verfassern gleich ist eine Unterscheidung nach geometrischen Kriterien. Ob jedoch ein Fachwerk ein anderes Tragverhalten besitzt als ein Balken, führt zu der eigentlichen Frage der Unterscheidung von Tragwerken: Wie werden äußere Beanspruchungen durch das Tragwerk fortgeleitet, also welche inneren Beanspruchungen - sprich welche inneren Kräfte treten auf. Nachfolgend werden verschiedene Auffassungen zur Typologie von Tragwerken vorgestellt, wie sie in der Fachliteratur zu finden sind. Daran anschließend wird die für diese Arbeit zugrunde gelegte Typologie definiert.

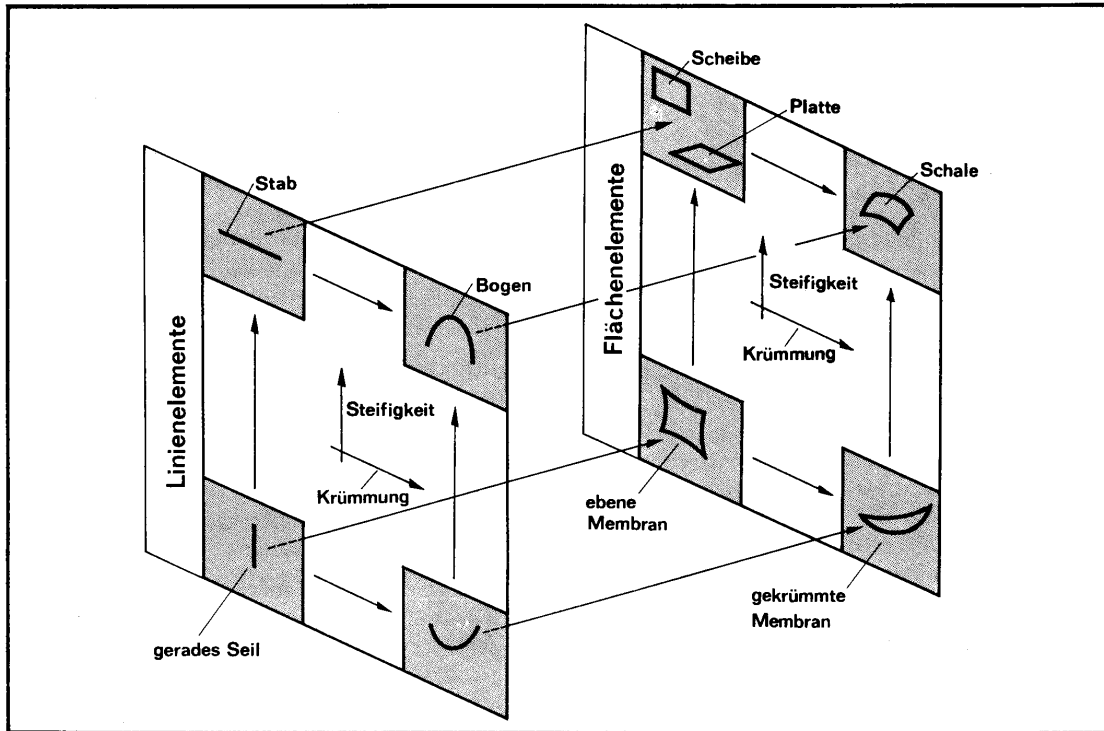
Ein Tragwerk ist nach Büttner/Hampe (1977) der Teil eines Bauwerkes, der die zur Sicherung der Bauwerksfunktion erforderliche Tragfunktion übernimmt. Die Tragfunktion besteht in der Erfüllung der Aufgabe, Kräfte aufzunehmen, weiterzuleiten, umzulenken und wieder abzugeben sowie Verformungen zu begrenzen. Unter dem Begriff Tragqualität wird die spezifische Fähigkeit zum Ausdruck gebracht, die Tragfunktion zu erfüllen und der Begriff Tragverhalten beschreibt die konkrete Umsetzung der durch die Tragqualität zum Ausdruck gebrachten Fähigkeit für eine konkrete Einwirkung Büttner/Hampe (1984). Tragelemente werden bei Büttner/Hampe nicht erläutert, stattdessen sind Tragstrukturelemente die nach ihrer Geometrie unterschiedenen ein-, zwei oder dreidimensionalen Elemente einer Tragstruktur, die ihrerseits das Modell des (in der Wirklichkeit vorhandenen realen) Tragwerks darstellt. Als Tragsystem bezeichnet man die werkstoffunabhängige Abstrahierung des Tragwerkes zur qualitativen Vorhersage, wie äußere Lasten die Elemente des Tragwerks beanspruchen.

Büttner/Hampe klassifizieren Tragwerke über das ideelle Modell, die Tragstruktur und ihre Elemente. Das Tragstrukturelement selbst ist durch seine Geometrie und seinen Werkstoff gekennzeichnet.

Die Typologisierung von Tragstrukturen ergibt sich bei Büttner/Hampe aus der Klassifizierung der Elemente:

Stabtragwerke	Träger Rahmen Fachwerke Bogen Stabnetztonnen Raumstabwerke Stabnetztonnen	<ul style="list-style-type: none"> • Belastung des Stabtragwerkes in der Stabachse; Aufnahme und Abgabe der Belastung durch Normalkräfte (Zug und Druck) • Belastung des Stabtragwerkes senkrecht zur Stabachse (Biegeträger, Rahmen); Aufnahme und Abgabe der Belastung weitgehend durch Biegemomente • Bei gekrümmter Stabachse (Bogen) Aufnahme der Belastung senkrecht zur Stabachse auch durch Normalkräfte möglich und angestrebt (Übereinstimmung von Bogenachse und Drucklinie aus Belastung)
Seiltragwerke	Einzelseile Radialseile Seilnetze und seilstabilisierte Membran	<ul style="list-style-type: none"> • Zugbeanspruchte Haupttragglieder
Hypartragwerke	Hyperbolische Paraboloid	<ul style="list-style-type: none"> • günstige Kombination von Zug- und Druckabtragung der Lasten • Zusammenwirken der Haupttragelemente in der Hyparfläche mit Stabilisierungs- und Verankerungselementen.
Ebene Flächentragwerke	Platten, Scheiben Falten Faltenbogen	<ul style="list-style-type: none"> • Scheibentragwerke tragen über Normalspannungen Last ab • Plattentragwerke (Belastung senkrecht zur Tragwerksebene); günstige Lastabtragung in zwei Richtungen • Faltwerke = Kombination aus Platten- und Scheibentragwirkung
Hochhaustragwerke	Skelettbau Hängehausbau Scheibenbau	<ul style="list-style-type: none"> • Strukturbedingtes Zusammenwirken der Tragwerkselemente bei Abtragung vertikaler und horizontaler Lasten
Schalentragwerke	Zylindertonne Kugelkalotte Zusammengesetzte Schalenkonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme von Flächenlasten weitgehend durch Normal- (Zug und Druck) und Schubkräfte • Aufnahme von Randwirkungen auch mit Momenten und Querkraften
Pneumatische Tragwerke	Tragluftkissen Traglufthallen	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisierung der Form durch Innendruck • Zugbeanspruchung im gesamten Tragwerk

Tafel 1.2.2. Klassifizierung der Tragstrukturelemente



Tafel 1.2.3. Klassifizierung der Tragstrukturen

		Tragstrukturelemente							
		Linienelemente				Flächenelemente			
		Biegeweich		Biegesteif		Biegeweich		Biegesteif	
Tragstrukturen	1-Dimensionale Tragstrukturen								
	2-Dimensionale Tragstrukturen								
	3-Dimensionale Tragstrukturen								
		gerade	gekrümmt	gerade	gekrümmt	eben	gekrümmt	eben	gekrümmt

Heino Engel leitet von der Kenntnis der Mechanismen, Kräfte aufzunehmen und weiterzuleiten eine einfache Gliederung der Tragsysteme ab Engel (1997). Die in so genannten „Tragwerks-Familien“ eingeordneten Tragsysteme haben prinzipiell einen gleichen Wirkmechanismus, das heißt die Kraftumlenkung, also das Prinzip der Steuerung des Kräfteflusses im Tragwerk ist prinzipiell gleich. Die aus diesem Wirken, aus der „Aktion“ abgeleiteten Namen (Formaktive, Vektoraktive, Schnittaktive, Flächenaktive und Höhenaktive Tragsysteme) sind zwar schlüssig, ansonsten aber in der Fachsprache der Architekten und Ingenieure eher ungebräuchlich und haben bis heute keinen Eingang in den alltäglichen Sprachgebrauch gefunden.

Einer gesonderten Definition bedürfen die hybriden Tragwerke. Wesentliche Beiträge zu Definition, Bildungsmechanismus und Eigenschaften dieser Tragwerke leisten die Autoren Gabriel und Wagner Gabriel/ Wagner (1989/90). Danach sind hybride Tragsysteme als eine Mischung von tragverhaltensorientiert unterschiedlichen Teilsystemen in einem Gesamttragwerk definiert. Auch die Autoren Eisert, Noack und Ruth befassen sich mit hybriden Tragwerken und erarbeiten Bewertungsstrategien für diese Tragwerksgruppe Eisert/Noack/Ruth (1999). Mit diesen ist es möglich, die Leistungsfähigkeit solcher Tragwerke, bezogen auf den Aufwand, abzuschätzen.

Tragwerke aus Kunststoffen können auch hybride sein, solche Tragwerke sind hervorragend geeignet, die weniger guten Eigenschaften des neuen Werkstoffes zu kompensieren.

Ein weiteres wichtiges Ordnungs- und Unterscheidungsprinzip sehen Gabriel und Wagner in der Beweglichkeit der Systeme (Abb. 94: Diagonale trennt bewegliche und starre Strukturen). In diesem Zusammenhang entsteht für Gabriel auch ein hybrides Tragwerk, wenn ein bewegliches System (z.B. ein Seil) durch starre Elemente stabilisiert wird. Das ist insofern schlüssig, da ein bewegliches System sich vom starren System durch unterschiedliches Lastabtragungsverhalten unterscheidet. Man betrachtet als Reaktion des Tragwerks auf äußere Lasten hier nicht die inneren Kräfte und Spannungszustände, sondern die Lageänderung der Elemente und die dazu erforderliche bzw. nicht erforderliche elastische Dehnung. Typische hybride Tragwerke nach dieser Ordnung sind die Faltstrukturen von Z.S. Makowski.

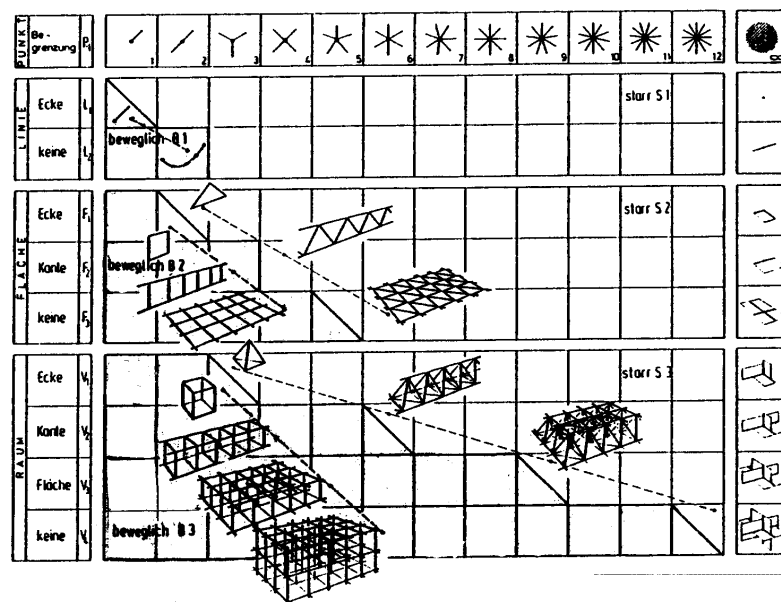


Abb. 94

Tragverhaltensorientierter Aufbau von Tragsystemen aus linearen Elementen nach Gabriel/Wagner (1989/90)

Die Ordnung der Tragwerke nach Polónyi (2003) wird hierarchisch geordnet nach

1. Geometrie
2. Tragwirkung
3. Zusammengesetzte Tragwirkung
4. Beanspruchung

und entspricht prinzipiell der Ordnung von Büttner/Hampe (Teilung prinzipiell in Tragwerke aus Linien/ Flächenelementen, Unterscheidung nach eben/gekrümmt). Sie ist aber verfeinert durch Auflistung der Zusammengesetzten Tragwirkung (z.B. Vierendeelträger = Fachwerk und Rahmen oder Faltwerk = Scheibe und Platte). Das Gliederungskriterium Beanspruchung unterscheidet vor allem die Schalen nach ihrer Lastabtragung (biegungsfrei oder biegebeansprucht). Diese Feingliederung bei den Schalen wird in dieser Arbeit übernommen.

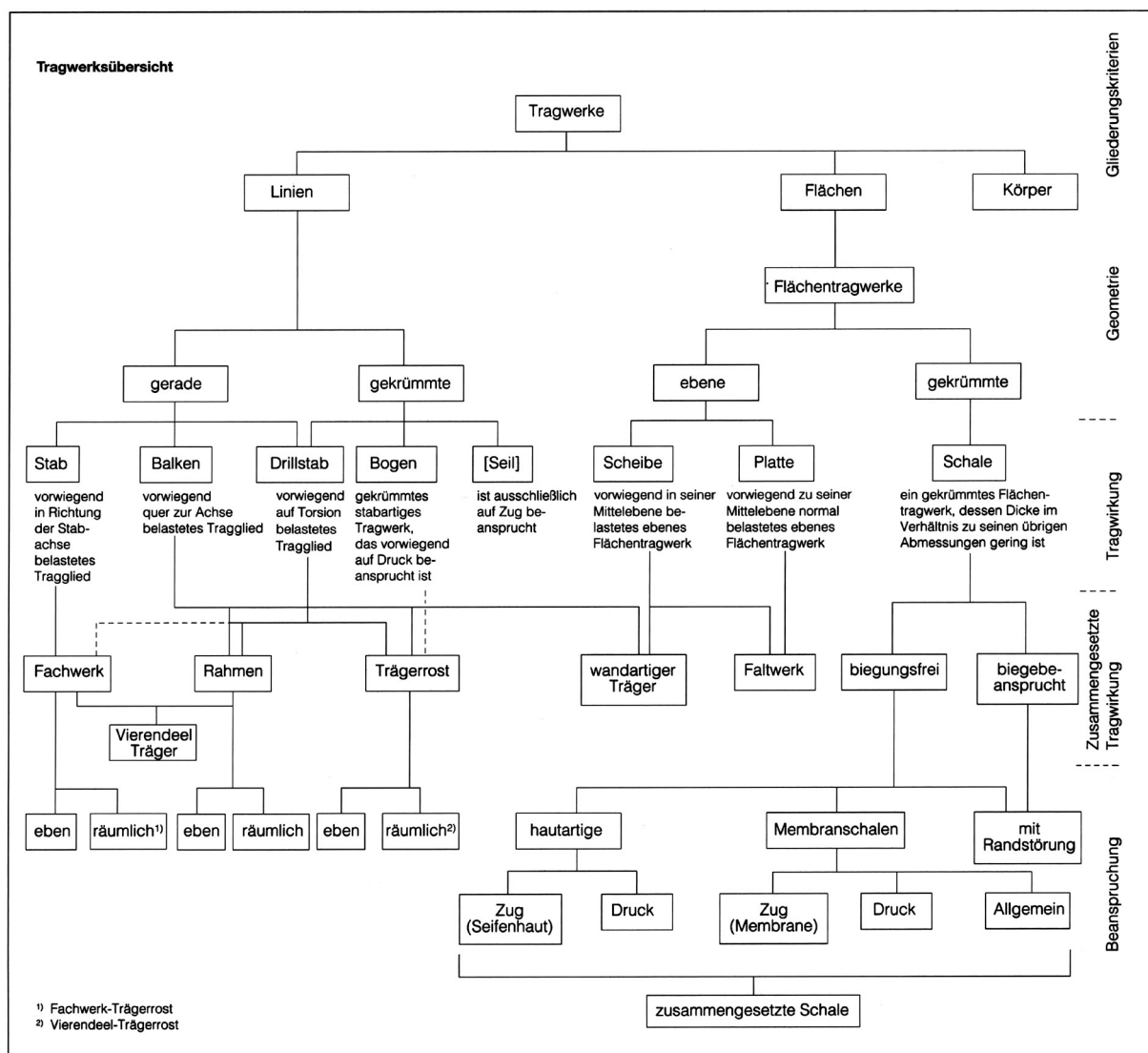


Abb. 95
 Tragwerksordnung nach Polónyi (2003)

Typologie der Tragwerke aus Kunststoffen

Im Gegensatz zu diesen Ordnungen vornehmlich den inneren Lastabtrag betreffend haben mehrere Autoren die Ordnung der Tragwerke aus Kunststoffen allein an der Körperform, mithin an der Geometrie festgemacht *IBK (1973)*, *Saechtling (1973)*, *Kunststoff-Überdachungen (1972)*. Hier tauchen erstmals Tragwerksgattungen wie Zellen und Kabinen auf, die bei keinem anderen Material herausgestellt werden. Es handelt sich auch um keine neuen Tragwerke, sondern um eine andere Konstruktionsart, eine Kombination von Deckenplatten und Wandscheiben. Gemessen an den konstruktiven Besonderheiten dieser etwa $2 \times 2 \times 2$ m messenden „Schachteln“ macht eine Abspaltung von den Platten und Scheiben durchaus Sinn. Die Besonderheiten liegen in der durchgehend runden Eckenausbildung und in der Herstellung, da eben nicht Platten und Scheiben zusammengefügt werden. Weiterhin tauchen sogenannte „Raumgitter-Flächentragwerke“ auf, eine Kombination von Kunststoffpyramiden, die durch Stäbe miteinander verbunden werden. Ein hybrides Tragwerk im Sinne von Wagner/Gabriel. Diese Tragwerke besitzen tatsächlich einen eigenen Lastabtragungsmechanismus, den die Autoren *Makowski (1968a und b)*, *Benjamin (1965)*, *(1969)* und *Huybers (1973)* eingehend untersucht haben. Auch diese Ordnung wird in der Arbeit übernommen. Eine gesonderte Betrachtung erfordern auch die Stabwerkskuppeln oder Stabnetz-kuppeln, wie sie massenweise nach dem geodätischen Prinzip von Buckminster Fuller hergestellt wurden.

Zusammenfassung und eigene Tragwerkstypologie

Die Einteilung der Tragwerke in dieser Arbeit dient primär der Beantwortung der Frage, welche Tragwerke für FVK besonders geeignet sind. Auch die Forschungsarbeit „Kunststoffhäuser und Raumzellen“ des *IBK (1973)* untersuchte zu diesem Zwecke die große Anzahl von 232 Häusern. Die Untersuchung räumt auf mit der träumerischen Vorstellung des konventionellen Hausbauers, die Kunststoffe als „Wunderstoffe“ anzusehen. Weit verbreitet war die Meinung, „daß man den Rohstoff in eine Maschine schüttet, und daraus in einem Arbeitsgang ein Teil entsteht, das zugleich die endgültige Form, Farbe, Festigkeit und Oberfläche erhält“. Dies „führt zum Gedanken, bei Vergrößerung der Produktionseinrichtungen auf diese Weise auch ganze Raumteile oder Gebäudeteile herzustellen.“ *IBK (1973)*, 32 In der Forschungsarbeit werden Kriterien erarbeitet, mit denen die Frage nach der Rentabilität beantwortet werden kann. Diese Frage wird mit dieser Arbeit auch zu beantworten sein. Es besteht allerdings nur die Möglichkeit, die Rentabilität der Kunststofftragwerke in ihrer Zeit zu messen. Die Frage lautete demnach: War das Vordach aus Glasfaser-Polyester 1970 günstiger als eines aus Beton oder Holz und nicht: Ist das Kunststoff-Vordach heute günstiger als seine Konkurrenten. Denn maßgeblich abhängig sind die Kosten eines Kunststofftragwerkes von der Schalungsform und -art und damit direkt abhängig von der Körperform. So können Formen für Kugel- oder Ellipsoidenschalen zwar aus durchweg gleichen Teilen hergestellt werden, durch ihre starre Form und fehlende Addierbarkeit sind sie jedoch unwirtschaftlich. Dem gegenüber steht ihre durch die doppelte Krümmung unerreicht günstige - weil membrankraftbestimmte - Lastabtragung mit geringstem Querschnitt und geringstem Materialverbrauch. Die Frage der Rentabilität für die damalige Zeit zu beantworten, hieße allein, sie in ihrer Zeit gegenüber anderen zu rechtfertigen. Für die heutige Zeit gelten sie infolge veränderter Herstellungsbedingungen nichts mehr. Infolgedessen wurde auf eine genaue Auswertung und Bewertung der Kunststofftragwerke nach bekannten Bewertungskriterien, wie sie beispielsweise in *Eisert (2004)* in anschaulicher Form erarbeitet wurden, verzichtet.

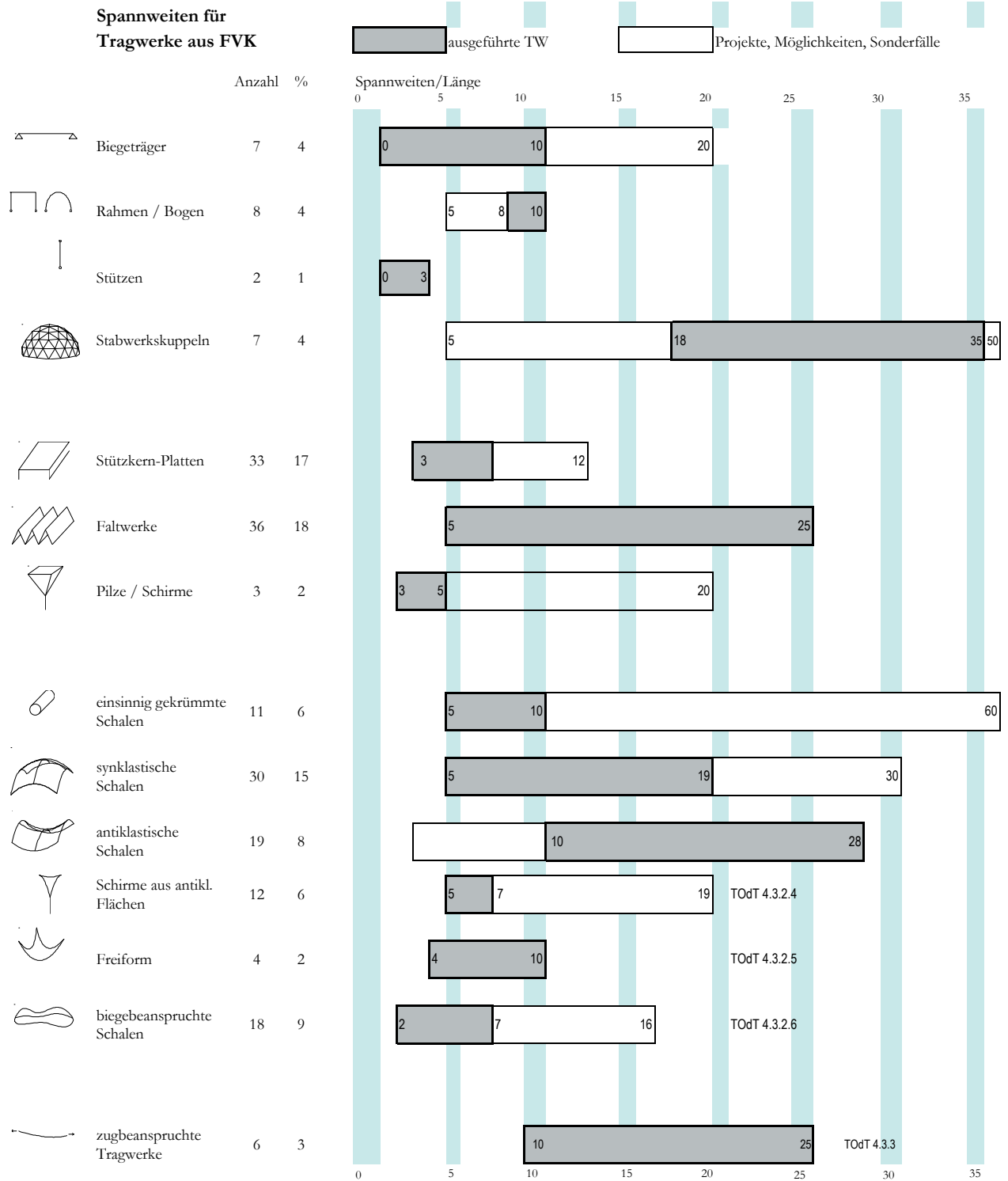
Die eigene Tragwerkstypologie folgt der hierarchischen Ordnung von *Polónyi (2003)* und *Büttner/Hampe (1984)* mit den Abhängigkeiten von

1. Geometrie (linear/flächig; eben/gekrümmt)
2. Tragwirkung/Beanspruchung (biegebeansprucht/normalkraftbeansprucht)
3. zusammengesetzte Tragwirkung

Innerhalb der unter Abb. 95 gezeigten Ordnung werden die hybriden Raumstabwerkstrukturen aus GFK-Pyramiden und Stahlstäben zu den Faltwerken gezählt, da ihr innerer Lastabtrag dem eines Faltwerkes sehr nahe kommt. „Geodätische Kuppeln“ (Stabnetzwerk-kuppeln) und „Zellen und Kabinen“ sind aufgrund ihres komplexen Lastabtrages gesonderte Kategorien. Es werden nur Tragwerke aus festen, sich selbst tragenden verstärkten Kunststoffen untersucht, das große, separate Feld der pneumatischen Konstruktionen ist darin nicht enthalten.

In Auswertung der untersuchten Tragwerke aus verstärkten Kunststoffen wird eine Übersicht über die möglichen Spannweiten erarbeitet. Sie stellt eine wesentliche Ergänzung zu der Arbeit von *Engel (1997)* dar, der für alle Tragwerke materialabhängig Spannweiten angibt, für die diese Tragwerke taugen. Der Seltenheit der verstärkten Kunststoffe Rechnung tragend, fehlen solche. Es war wünschenswert, dass die vorliegenden Erkenntnisse mit denen von Engel korrespondieren können. Daher wurde auch die äußere Form der Übersichten denen von Engel angepasst. Der dick markierte Spannweitenbereich ergibt sich aus der Auswertung der realisierten Tragwerke. Gestrichelt werden die Spannweiten, die entweder als einmalige oder seltene Sonderfälle gebaut wurden oder die als Möglichkeiten noch bestehen. Inwieweit diese Auswertung repräsentativ ist, lässt sich anhand der ebenfalls notierten Anzahl der Projekte ablesen. So ist die Anzahl von 6 Biegeträgern nicht repräsentativ und weist auf die Ungebräuchlichkeit dieses Tragwerkes hin. Doppelt gekrümmte Schalentragsysteme waren hingegen für 33 Typen nachweisbar.

Ob eine Nicht- oder Mehrfachanwendung durch die Nichteignung des Tragwerkes für FVK gerechtfertigt ist, wird in diesem Kapitel zu klären sein. Es werden 250 Tragwerksbeispiele, dies sind fast alle gebauten, untersucht. In der Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ (TOdT) sind diese Beispiele gelistet. Diese „Kerntabelle“ verfügt neben der Darstellung des Tragwerkes über alle anderen projektbeschreibenden Details wie Name, Hersteller, Ingenieur, Architekt, Aufstellort des Tragwerkes und ist mithin auch ein Projektverzeichnis inkl. Quellenangabe. Das in der Tragwerkslehre so häufig abgefragte „wie weit kann das Tragwerk spannen“ wurde anhand der Spalte 5 versucht zu beantworten. Was detaillierte Angaben über Tragwerk, Spannweite oder gar Belastung angeht, ist die Quellenlage mehr als mager. Trotzdem sind alle wirklich auffindbaren Angaben dazu vermerkt. Ließ sich aus den Unterlagen die Belastung über Näherung abschätzen, so wurde dies getan und auch vermerkt. In weit mehr als 50% der Fälle konnten jedoch keine Angaben gemacht werden.



4.2 Tragwerke aus verstärkten Kunststoffen

Die ersten Tragwerke aus FVK waren **geodätische Kuppeln**, erfunden und erbaut von Richard Buckminster Fuller *Dietz (1955), 90*. Eine weite Verbreitung fanden auch **synklastische Schalentragwerke**, die fast genauso früh wie Buckminster Fullers Geodome 1956 von Heinz Isler entworfen und produziert wurden. Noch in den folgenden Endfünfziger Jahren lassen sich alle Tragwerksformen, die aus FVK realisiert wurden, nachweisen. Yves Magnant und Ionel Schein führten auf der Hausaltmesse *Arts des Menagers* in Paris 1956 das französische Schneckenhaus vor, in welchem sowohl **Platten** als auch **Biegeträger** enthalten sind. Die beiden französischen Entwerfer waren 1956 gemeinsam mit dem Architekten Coulon für die Coulon-Schein-Kabine verantwortlich, eine kaum größer als 2×2 m messende Einheit komplett aus FVK. Solche Zellen oder Kabinen oder **Boxen** waren sehr beliebt in der Anwendung. Mehrfach angewendet wurden auch **biegebeanspruchte Schalenformen**. Das Monsanto House of the Future ist das erste Beispiel dieser Tragwerksform. **Faltwerke**, die für den Kunststoffbau von großer Bedeutung waren, wurden erst später angewandt (1962). Mitte der 60er Jahre hatten Z.S. Makowski und seine Mitarbeiter, darunter Renzo Piano maßgeblichen Anteil an der weitreichenden Erforschung und Verbreitung dieses Tragwerkstyps. **Einsinnig gekrümmte Schalen**, darunter vornehmlich Zylinderschalen fanden große Verbreitung als Ingenieurbauwerke. Als Tragwerksform für Silos und Schornsteine haben sie bis heute einen festen Platz gefunden und sind in dieser Rubrik wirtschaftlich in Konkurrenz mit anderen Materialien. **Antiklastische Schalen** und **Schirmschalen** aus antiklastischen Flächen sind aufgrund ihres Tragverhaltens den gleichsinnig gekrümmten Schalen vorzuziehen, da sie eine größere Steifigkeit erreichen. Es ist trotzdem eine geringere Verbreitung zu verzeichnen als bei den synklastischen Schalenformen und den biegebeanspruchten Schalen. Wenige Tragwerksbeispiele lassen sich für **zugbeanspruchte Tragwerke** aufzeigen, obwohl der faserverstärkte Kunststoff für diese Tragwerke am besten geeignet ist.

4.2.1 Lineare Tragwerke

4.2.1.1 Biegeträger

Biegeträger aus verstärkten Kunststoffen wurden praktisch nicht entworfen. Der geringe E-Modul des Materials wurde von den meisten Konstrukteuren erkannt und ein rein biegebeanspruchtes Tragwerk nicht in Betracht gezogen. Einige Beispiele lassen sich trotzdem anführen. In fast allen in der Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ gezeigten Beispielen ergaben sich Biegeträger als sekundäres Tragwerk eines Flächentragwerkes. Beim französischen Schneckenhaus von 1956 wurde die runde Dachplatte in Achtelkreise geteilt, deren Ränder durch hohe Stege gebildet werden. Hier wird das Tragwerk Biegeträger erstmals angewendet. Man dachte diese Stege als Elemente der Fügung und nutzte sie gleichermaßen zur Lastweiterleitung. Beim Wohnhaus fg 2000 von Wolfgang Feuerbach verhielt es sich ähnlich. Die 1,25 cm breiten Plattenelemente sind Sandwichkonstruktionen. Sie wurden jedoch von vornherein statisch nicht als solche angesetzt, da der in der Herstellungstechnik erfahrene Feuerbach ein tragfähiges, schubfest verbundenes Sandwich im Handlaminierverfahren als nicht realisierbar ansah. So wurden die ffügungstechnisch nötigen Randstege in einer Steghöhe von 40 cm ausgeführt, sie steifen demnach nicht mehr die Sandwichplatte aus, sondern sind Primärtragwerk, welches durch die Platte ausgesteift wird (Abb. 96).

Die 1973 in Großbritannien errichtete Fußgängerbrücke wird wie ein Hoher Doppel-T-Träger ausgeführt, es ist eine für die damalige Zeit ungewöhnliche Konstruktion, da Trägerprofile aus FVK nicht wie heute als industriell vorgefertigte Produkte serienmäßig (durch die Firma Fiberline) angeboten wurden. Sie wurden speziell für diese Bauaufgabe gefertigt. Für den Fußboden, Träger und Oberbau wurden hier vorgefertigte U-Profile aus verstärktem „eXtrem-Material“ verwendet.

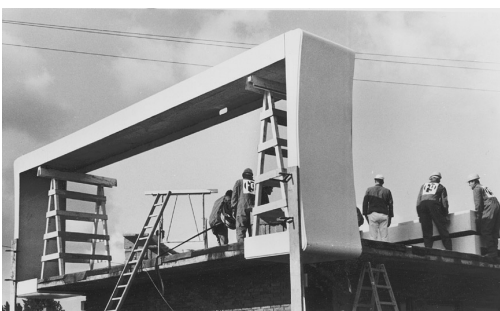


Abb. 96
der 40 cm hohe Randbalken wird das Tragwerk des fg 2000
Feuerbach (1970)

4.2.1.2 Rahmen, Bogen

In dieser Rubrik werden Rahmentragwerke eingeordnet und solche Bogenformen, deren Tragverhalten einem biegebeanspruchten Rahmen ähnlich ist. Erste nachweisbare Bauten finden sich erst Mitte der 1960er Jahre.

Auch diese Tragwerksform aus FVK ist wenig verbreitet. Beispiele sind das bereits unter Biegeträgern aufgeführte fg 2000 und dessen Weiterentwicklung. *Dieterich (ca. 1967)* beschreibt das Tragwerk in der Planungsmappe des fg 2000 folgendermaßen „Je zwei Wandelemente und ein Dachelement bilden ein Rahmensystem, das an den Fußpunkten [...] gelenkig und in den oberen Ecken biegesteif ausgebildet wird. Nachgewiesen wurde die maximale Spannweite von 10,0 m und die maximale Systemhöhe von 3,50 m. Die Windlasten auf die Giebelseiten werden ungünstigst 4 Wandelementen je Seite zugewiesen. Die einzelnen Elemente bestehen aus Sandwichkonstruktionen und sind kassettenförmig ausgebildet. Sie werden an den Stegen jeweils miteinander verschraubt.“ Das Tragwerk Rahmen ergab sich hier durch die Bedingungen der Herstellung und durch die notwendigen Fügungen. Möglich ist, dass dieses Tragprinzip auch noch bei anderen Bauten angewendet wurde, da sich hohe Randstege an den Plattenrändern durch ihre höhere Steifigkeit gegenüber der Platte als primäres Tragwerk anbieten. Sicher ist das Rahmenprinzip beim Fokker Haus von 1965 und beim Leningrad-Haus Projekt von 1962 (Abb. 97). Das Tragwerk des fg 2000 wird sowohl im Kapitel Bemessung als auch im Anhang ausführlich beschrieben.

Hallenkonstruktionen mit biegebeanspruchten Rahmen wurden mehrfach angewendet. Serienprodukte sind die von der BASF hergestellten Gewächshäuser und die Philips Messhallen, welche als Schutzhallen für Antennen und Messgeräte Verwendung fanden.

Der 1972 errichtete Gemini Bungalow lässt sich nicht exakt einer Tragwerksform zuordnen. Optisch eine Schalenform ist deren Krümmung jedoch zu gering, sodass der Lastabtrag über Biegung funktioniert. Das Tragwerk wird vom Statiker *Carsten Langlie (1976)*, 125 als Dreigelenkbogen idealisiert (alle Beispiele TOdT 4.2.1.2).

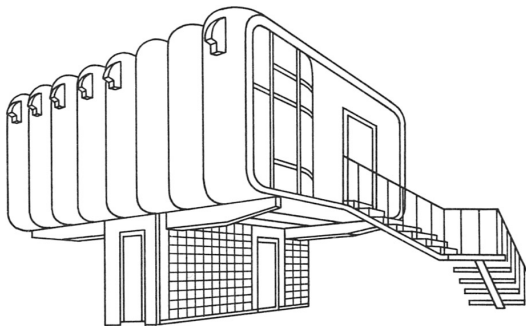


Abb. 97
im Tragsystem dem fg 2000 ähnlich ist das ebenfalls als Rahmentragwerk
ausgeführte Leningrad-Haus
Arjapetov (1986)

4.2.1.3 Stützen

Druckbeanspruchte und stabilitätsgefährdete Bauteile aus FVK wurden im betrachteten Zeitraum nicht realisiert. Infrage kamen Stützen aus FVK nur dann, wenn es aus Gründen der Medienbeständigkeit keine andere Alternative gab oder wenn aus Gründen der unterschiedlichen Verformung innerhalb eines Tragwerkssystems keine anderen Materialien verwendet werden sollten. Die beiden angeführten Beispiele folgen dieser zweiten Anforderung. Es sind Fenster- bzw. Türpfosten innerhalb eines gekrümmten Tragwerkes. Die Stützweiten sind gegenüber der Querschnittsfläche klein, eine Stabilitätsgefährdung ist somit ausgeschlossen. Die aufgeführten Beispiele verwenden Hohlprofile als Tragquerschnitte.



Abb. 98 (links) und 99
Ausschnitt des Rondo mit Fensterpfosten aus FVK *Fomek* (2004)

Zusammenfassung der linearen Tragwerke

Stützen und Biegeträger als lineare Stabwerke sind nicht per se ungeeignet in ihrer Ausführung aus FVK. Die erwähnten Randträger verstärkter leichter Platten ergeben sich fast immer zwangsläufig aus Gründen der Fügung. Zwei Plattenteile werden fast immer über Stege miteinander verbunden. Nur in einem Falle kommt das Stoß-an-Stoß-Fügen zum Tragen, nämlich bei den gekrümmten Platten (Schalen) für die XIV. Triennale 1967 in Mailand von Renzo Piano. Ansonsten kann bei Beachtung der Schalungsbedingungen der Randsteg als tragendes Stabelement betrachtet werden.

Im Gegensatz zur geringen Anwendungsdichte von Stabelementen standen die umfangreichen theoretischen Untersuchungen zu diesem Tragwerkstyp. Unter der Aufsicht von Stefan Polónyi wurden an der Technischen Universität Berlin von 1965-73 Untersuchungen zu stabartigen Bauteilen aus FVK gemacht *Langlie* (1971). *Polónyi* (1969) selbst gibt für das Konstruieren von stabartigen Bauteilen folgende Empfehlungen: „der E-Modul des GUP ist aber sehr niedrig. Infolgedessen werden druckbeanspruchte Stäbe früh zum Knicken, biegebeanspruchte – sind sie nicht gehalten – früh zum Kippen neigen. Wirtschaftlich ist die Konstruktion, wenn die kritische Last bei Spannungen auftritt, die nahe der Bruchfestigkeit liegen. [...] das bedeutet bei druckbeanspruchten Stäben, daß praktisch nur Hohlprofile in Frage kommen.“ Auch *Ackermann* (1972) stellt einen Beitrag zur Berechnung viskoelastischer Stabwerke zur Verfügung. Was nicht für Tragwerke aus FVK gilt, trifft aber für deren Bemessung zu: Man muss keine Stabwerke bauen, man muss aber mit den einfachen Stabwerken als Modell beginnen, um systematisch das Verhalten von Tragwerken unter Last zu beurteilen.

4.2.1.4 Stabwerkskuppeln, Stabnetz-kuppeln, geodätische Kuppeln

„[...] den aufsehenerregendsten Gebrauch von Kunststoffen als tragendes Material zeigten die Radomes (wetterfeste Umhüllung von Radargeräten). Ihre Durchmesser sind teilweise beträchtlich, so weisen die Kuppeln in Fylingdales in Yorkshire einen Durchmesser von 42 m auf.“ *Makowski* (6/1969), 225

Neben der großen Gruppe der Silos stellen die Stabwerkskuppeln in ihrer Verwendung als Radomes die größte Anwendung von verstärkten Kunststoffen als Tragwerk dar. Gebaut seit 1954, erfolgte die Patenterteilung für solche Radarkuppeln nach Anmeldung durch Richard Buckminster Fuller erst am 31. August 1965 www.solwaygallery.com. Bis heute wurden über 200.000 Stück auf der Erde gebaut.

Stabwerkskuppeln aus faserverstärkten Kunststoffen eignen sich deshalb so ausgezeichnet für diese Anwendung, da sie

1. die Radarstationen mit nichtmetallischen Materialien einhüllen, da sie

2. durch ihr geringes Gewicht und die Möglichkeit der Tragwerksteilung ohne Schwierigkeiten an ihre Aufstellorte (meist auf einem Berg) gebracht werden können und da
3. die kugelige Form der Außenhülle, die durch den Schwenkbereich einer Antenne definiert wird, aus FVK problemlos herstellbar ist.

Entscheidend für den Durchbruch in der Anwendung waren Fullers zurückliegende Untersuchungen zur Unterteilung der Kugeloberfläche, die in einem geodätischen Netzwerk mündeten. 1954 erfolgt die Patenterteilung für die Baukonstruktion geodätischer Kuppeln. Im selben Jahr wird am Lincoln Laboratory, einer Fuller unterstehenden Forschungseinrichtung, die Entwicklung eines metallfreien Kuppeltyps betrieben, der die erste Radom-Installation aus Polyester-Fiberglas auf dem Mt. Washington folgt *Dietz (1967), 306*. Die meisten Stabnetz-kuppeln und Radome sind nach dem geodätischen Prinzip



Abb. 100
Haystack-Radom 1967
Skeist (1966)

geteilt. Bei diesem Prinzip entstehen durch Projektion eines Ikosaeders (20-Flächner) auf die Kuppeloberfläche 20 Dreiecke gleicher Seitenlänge, die wiederum zu gleichen Sechsen- und Fünfecken zusammengefasst werden können. Bei großen Durchmessern müssen die 20 Großdreiecke aufgrund der Spannweitenbegrenzung weiter unterteilt werden, was eine Verschiedenartigkeit der Stablängen nach sich zieht. Das Ziel Fullers, eine Kugeloberfläche in gleiche Elementen zu unterteilen, gelingt also bei großen Durchmessern, wie sie alle Radome aufweisen, nicht. Dies belastet zwar die Formkosten, insbesondere wenn Heißpressformen aus Qualitätsgründen erforderlich sind, doch kann das Problem gemindert werden, wenn sich durch große Stückzahlen die Form schnell amortisiert. Im Falle der Radome war dies ein gültiges Prinzip. Unter www.radome.net bieten Hersteller aus den USA die seit 1965 vier gebräuchlichen Konstruktionstypen an. Sie werden als nichtleitende räumliche Rahmen - Dielectric Space Frame (DSF) – bezeichnet.

1. Die erste Variante ist eine dünne Membranschicht (1 mm) über einem geodätischen Raster aus GFK-Stäben.
2. Die zweite eine einfache Laminatschicht von max. 2,3 mm.
3. und 4. Der dritte und vierte Konstruktionstyp ist eine Sandwichkonstruktion mit 2 oder für besonders belastbare Radome mit 3 Sandwichschichten.

Die Dimensionierung der Dämmschicht der Sandwichfüllung wird auf die Lasten und die Streuverluste der Strahlung aufgrund des Materials eingestellt. Die ebenfalls in GFK hergestellten Flansche dienen neben der Verbindung der Elemente hauptsächlich dem Lastabtrag der Kräfte in das Fundament. Die einzelnen drei- oder sechseckigen Elemente können flächig, doppelt gekrümmt oder auch aus ebenen gefalteten Flächen bestehen. Auch heute noch sind die aus FVK gebildeten Geo-Dome optimal für Radarstationen geeignet.

Das Teilungsprinzip der geodätischen Kuppeln schließt viele Möglichkeiten der Tragwirkung ein, die alle durch FVK realisiert werden können:

- A) Die durch Projektion und Teilung erhaltenen Stäbe sind die tragende Struktur, sie werden mit nichttragenden Dreiecken ausgefacht.
- B) Die Stäbe und Flächen tragen gemeinsam, es handelt sich um eine randverstärkte (evt. gekrümmte) Platte. Mit Hinblick auf die Verwendung von Kunststoffen in dieser räumlichen Struktur wäre eine gemeinsame Tragwirkung von Stäben und vorgespannter Kunststoffhaut ähnlich wie bei dem Hossdorf'schen Tragwerk für die Expo 64 in Lausanne denkbar.
- C) Die Flächen bilden allein die Tragstruktur. Man kommt damit dem Tragverhalten einer Schale sehr nahe, besonders wenn die Flächen gekrümmt sind. Für Elemente aus FVK ist dies z.B. sehr gut vorstellbar. Sie wären gleichzeitig Tragstruktur und Raumabschluss. Die von Buckminster Fuller realisierten Radome tragen nach diesem Prinzip.

Eine andere Möglichkeit, die geodätische Grundstruktur mit tragenden Elementen zu materialisieren, sind die „Fly’s Eye“. Hier ist die Schalentragwirkung offensichtlich, wenn auch durch die „Augen“ gestört. Sie sind daher unter den Schalentragwerken eingeordnet. Die Fly’s Eye Kuppeln werden aus gekrümmten Fünf- und Sechsecken gebildet. Es sind GFK-Formteile mit großen Öffnungen. Die gebauten Beispiele sind handlaminiert, da sich der Formenbau aufwändig zeigte. Die Montage der Einzelelemente ist wiederum sehr effektiv und es finden sich auch Beispiele der Fügung mit überlappendem Steg. Auch die Fly’s Eye wurden zum Patent angemeldet und am 3. August 1965 unter dem Namen Monohex zugelassen *Dietsch (6/1955)*.

Zusammenfassung:

Die Umsetzung einer großen Anzahl von Stabwerkskuppeln mit tragenden Elementen aus FVK ist folgenden Gründen zu verdanken: Die Forschungsarbeiten Buckminster Fullers zur Einteilung der Kuppeloberflächen waren genügend fortgeschritten und suchten eine Anwendung. Die Radome boten sich als Anwendung insofern an, weil nur mit dem Material FVK die gestellten Anforderungen an Leichtigkeit, Mobilität, hohen Grad der Vorfertigung, Strahlungsunempfindlichkeit erfüllt werden konnten. Wie schon bei der Überkuppelung der Fordrotunde benötigte es zum Durchbruch eines solchen neuen Systems aber einen zweiten wesentlichen Faktor, einen geeigneten Bauherren. Der Tatsache, dass die Radaranlagen als Frühwarnsysteme im Kalten Krieg massenweise benötigt wurden, ist es zu verdanken, dass dieser Konstruktionstyp, dieses Tragwerk sich als zukunftsweisend erwies und heute noch Bestand hat.

4.3 Flächige Tragwerke

Während andere Baustoffe wie Holz oder Stahl aufgrund ihres Wachstums bzw. ihres Herstellungsprozesses (Walzen) natürlicherweise stabartige Bauteile hervorbringen, können mit faserverstärkten Kunststoffen infolge ihrer flüssigen Konsistenz, die in einer Form erhärtet, flächige Bauteile hervorgebracht werden. Sinnvollerweise lassen sich aus den bauphysikalischen Eigenschaften aller faserverstärkter Kunststoffe neben der Tragfunktion noch weitere Schutzfunktionen für das Bauwerk abdecken. Dichtende Funktion, wärme- und schalldämmende Funktion, Raumabschluss und Lichtlenkung sind durch flächige Bauteile aus FVK problemlos realisierbar.

Die Art der gewünschten Schutzfunktion entscheidet maßgeblich über das Tragwerk und dessen Konstruktion.

Wärme- und schalldämmende Eigenschaften werden mit Sandwichkonstruktionen erreicht, sie eignen sich für alle Formen flächiger Tragwerke. Raumabschluss wird per se durch alle flächigen Tragwerke erreicht. Wird die Oberfläche des tragenden Elementes aus verstärkten Kunststoffen mit einer Schutzschicht, bezeichnet als Gelcoat, versehen, ist zudem die dichtende und wasserabweisende Funktion gegeben. Durchsichtige Abgrenzungen werden mit glasfaserverstärkten Kunststoffen praktisch nicht erreicht, ein Lichtdurchgang von 80 % ist aber erreichbar.

Höchste Anforderungen an die Lichtdurchlässigkeit werden für Gewächshäuser gestellt. Die Nutzung des neuen Werkstoffes für diesen Bauwerkstyp war vollkommen neu. Seit Beginn der 1960er Jahre wurden GFK-Elemente für den Bau von Gewächshäusern eingesetzt. Gegenüber üblichen Konstruktionen aus Stahlprofilen und Glas hatten sie den Vorteil des Wegfalls von Wartungsaufwendungen infolge Korrosion und Glasbruch. Auch die geringere Wärmeleitung gegenüber Fensterglas wirkte sich positiv auf die Energiebilanz aus. Der als günstig angesehene Lichtdurchgang von 70-80% Tageslicht wird nur mit sehr dünnen, etwa 1,2 bis 1,5 mm einschichtigen Flächen erreicht *Saechtling (1975), 208 und Ackermann (2001), 507*. Solche extrem stabilitätsgefährdeten Flächen müssen durch ihre Formgebung maximal stabilisiert werden. Doppelte Krümmungen oder Faltungen sind geeignete Möglichkeiten, wie die elliptischen Schalenbogenträger der DDR-Gewächshäuser zeigen (Abb. 101, 102). Tragwerke für Gewächshäuser können auch deshalb sehr dünn hergestellt werden, weil sie durch ihr minimales Eigengewicht, Wind und Temperaturdifferenz belastet werden. Im Winter werden sie beheizt und der Lastfall Schnee entfällt.



Abb. 101 (links) und 102
nach gleichem Prinzip hergestellt sind die Schalenträger für die Busbahnhofüberdachung in Chemnitz und die Gewächshäuser
Hintersdorf (1972)

4.3.1 Flächige Tragwerke aus ebenen Flächen

4.3.1.1 Platten

Platten sind Flächentragwerke, die durch Kräfte senkrecht zu ihrer Ebene eine Verformung der Mittelfläche erfahren. Als biegebeanspruchte Tragwerke wird ihre Tragfähigkeit über die Dicke entschieden, was sie gegenüber anderen Flächentragwerken weit unterlegen macht. Aufgrund ihrer ebenen Auf- und Untersicht kommen sie jedoch für viele Anwendungen in Frage, für die gekrümmte oder gefaltete Flächentragwerke nicht geeignet sind. Platten sind das im Bauwesen am häufigsten verwendete Flächentragwerk. Platten aus FVK nehmen hingegen innerhalb der Flächentragwerke der Ausführungsperiode 1955-1980 keine übergeordnete Rolle ein.

Platten aus faserverstärkten Kunststoffen sind immer Stützkernkonstruktionen. Durch die Auflösung des Querschnitts in tragende Deckschichten und den Stützkern gelingt es, die nötige Dicke und Steifigkeit bei vertretbarem Materialaufwand zu erzeugen. Betrachtet man das Tragwerk Platte aus FVK, so bedeutet dies, man nimmt die Stützkernkonstruktionen in Augenschein, die ja eine Konstruktionsweise des Flugzeugleichtsbaus waren und durch die Bauingenieure gewissermaßen „nachgenutzt“ wurden.

Stützkernkonstruktionen

Stützkernkonstruktionen sind seit Mitte der 1940er Jahre bekannt. 1945 produzierte L.S. Meyer erstmals die als Honeycomb bekannten Wabenkerne. In England entstand in der Zeit 1940/42 die Balsaholz/Sperrholzkombination als Leichtbau für den Flugzeugbau. Zur gleichen Zeit entwickelte man in den USA das geklebte Sandwich-System mit Wabenkernen Hoppe (1963), 767. 1940 wurde erstmals Polyurethan hergestellt, das als Schaum unter der Abkürzung PUR-Schaum vielfältige Verwendung in Stützkernkonstruktionen fand.

1954 ist mit den Platten von 5,0 m Spannweite für ein Gewächshaus die erste Anwendung von FVK in einer Stützkernkonstruktion für ein Plattentragwerk zu verzeichnen Plastic Industrie (1953), 27. Die bis dahin gemachten Erfahrungen im Maschinenbau (Automobil, Flugzeugbau) gründen sich auf Konstruktionen mit Deckschichten aus dünnen Stahl- oder Aluminiumblechen und aus Stützkernen, gebildet von Stegen, Gittern, Blechen oder aus harz imprägnierten Papierwaben. Die Verwendung von Schäumen aus Kunststoffen begann erst mit der Entwicklung des FVK-Baus seit Anfang der 1960er Jahre. Die ersten Beispiele von Plattentragwerken sind folgerichtig Stützkernkonstruktionen mit Deckschichten aus glasfaserverstärktem Polyester und Kernen aus Wabenplatten (Französisches Schneckenhaus 1956, Solvay-Pavillon 1958) oder mit Wellplatten (Gewächshausplatten der Fa. Monsanto 1954). Schaum als Stützstoff ist erstmalig in einem Plattentragwerk von Ludwig Doernach (1959) nachweisbar (alle TÖd'T 4.3.1.1).

Deckschichten und Kernwerkstoffe einer Platte können, wie gesehen, unterschiedlich beschaffen sein.

Als Deckschichten kamen für alle Anwendungsfälle glasfaserverstärkte Kunststoffe, hauptsächlich glasfaserverstärktes Polyester zur Anwendung. Als Stützkern wurden anfangs Zellenstrukturen mit Waben oder Wellenstegen, wie in Abb. 103 dargestellt, verwendet. Sie hatten keine große Verbreitung. Nur fünf Beispiele solcher Plattentragwerke lassen sich aufführen.

Eine Sonderform der Zellenstrukturen stellen die von Heinz Isler entwickelten Rippenplatten dar Isler (1975). 1959 verwendete er erstmals eine solche Platte für ein Wochenendhaus, Anwendungen größerer Spannweite und ausgefeilter Techno-

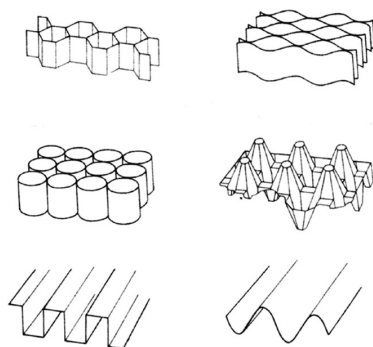
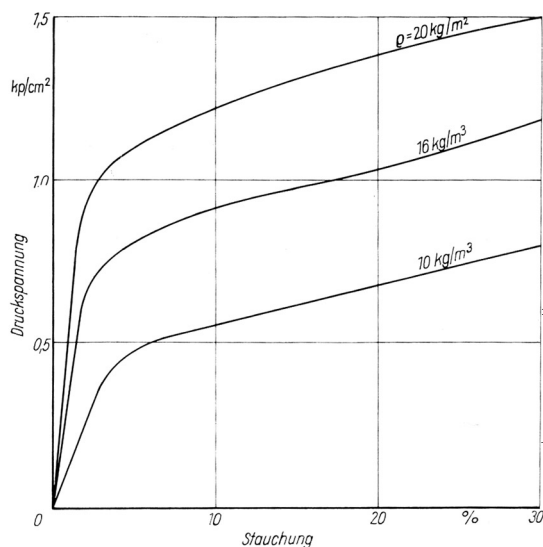


Abb. 103
Stützkern nach
Hintersdorf (1972), 70

logie sind die Platte für die Tankstelle Thun 1960 und die rollbaren Dachfenster von 12 m Spannweite für das Rheinkraftwerk Säckingen 1965 (alle TÖD'T 4.3.1.1). Isler wandte eine halbserielle Methode der Herstellung an. Er erreichte damit ungewöhnlich große Spannweiten mit sehr lichtdurchlässigen Platten. Die Deckschichten wurden vor Ort laminiert, in die halberstartete Masse wurden die vorgefertigten Gitter eingesetzt. Bei der Tankstelle Thun verwendete er statt der Gitter vorgefertigte Würfel, die in den Bereichen der Lasteinleitung über den Stützen zur Aufnahme der Querkkräfte noch verstärkt wurden. Die Platte ist mit ihren 14,50×22 m Ausmaßen und 9,0 m Spannweite die größte ihrer Art (Abb. 77, 78). Eine detaillierte Beschreibung der Tankstelle Thun befindet sich im Anhang.

Von allen Wabenkernen sind die kunstharzimprägnierten Papierwaben technisch am bedeutendsten. Sie haben einen relativ niedrigen Preis. Im Vergleich mit harten synthetischen Schaumstoffen zeigt sich, dass ihre Druck- und Schubfestigkeiten 3 bis 6 mal, die E-Moduln 10 bis 20mal und die Schubmoduln 8 bis 10mal höher liegen *Hintersdorf (1972), 70*. Infolge der geringeren Wärmedämmung von Stützkonstruktionen mit Waben gegenüber Schaumkernkonstruktionen stand ihnen trotz ihrer hervorragenden Verformungseigenschaften keine große Anwendung bevor. Plastschäume fanden dagegen eine große Verbreitung für die Anwendung in Stützkernkonstruktionen als Plattentragwerk. Mehr als 20 Anwendungsformen verzeichnet die Tabelle. Von den bekannten Hartschäumen wurde entweder Polyurethanschaum (PUR) oder der wärmetechnisch ungünstigere Polystyrolschaum (PS) verwendet. Die Schäume weisen einen großen Streubereich hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte auf (Abb. 104b). Mit zunehmender Dichte nehmen Druckfestigkeit, Schubfestigkeit, E-Modul und Schub-Modul zu. Die Spannungs-Verformungskurve Abb. 104a zeigt, dass oberhalb der Proportionalitätsgrenze die Zellen stetig und irreversibel deformiert werden. Eine weitere Versagensmöglichkeit innerhalb von Stützkernkonstruktionen ist das Schubversagen zwischen Deckschicht und Kern. Begünstigt durch die Herstellungsproblematik wurde in vielen Fällen davon berichtet, z.B. bereits unter 3.2.2, dass die ungenügende Verbindung zwischen Deck- und Kernschicht die Tragfähigkeit der Konstruktion gefährdete.

Theoretisch konnte der Nachweis der Stabilität auf Grundlage diverser Veröffentlichungen geführt werden. *Polónyi (12/1970)* leistete dazu einen ebenso großen Beitrag wie *Hintersdorf (1965)* speziell für Stützkernkonstruktionen oder später *Saechtling (1973), 467* als Zusammenfassung der Beiträge zur Konferenz *Plastics in Building Structures (1966) in London*.



Dichte ρ [kg/m³]	σ_{dB} [kp/cm²]	τ_{dB} [kp/cm²]	E [kp/cm²]	G [kp/cm²]
20	1,0	0,6	40	20
30	1,5	0,9	60	30
40	2,2	1,3	80	40
50	3,1	1,8	100	50
60	4,0	2,4	130	65
80	6,0	3,6	190	95
100	8,0	4,8	280	140
120	10,5	6,3	400	200
150	15,0	9,0	600	300
200	28,0	16,8	900	450

Abb. 104a (links)

Spannungs-Verformungs-Kurve von Polystyrolschäumen mit verschiedener Dichte *Hintersdorf (1972), 702*

Abb. 104 b

unterschiedliche Schaumfestigkeiten nach *Hintersdorf (1972), 70*

Als Primärkonstruktionen besitzen Platten eine begrenzte **Spannweite**. Es können Spannweiten bis 7 m überdeckt werden, was aus allen realisierten Beispielen ersichtlich wird. Die Dicke der Platten ist sehr unterschiedlich und zeigt prinzipiell keine direkte Proportionalität zur Spannweite. Während für Stahlbetonplatten über die Begrenzung der Biegeschlankheit und die Beziehung $h \geq l_i/35$ und $d = h + 3\text{cm}$ die Plattendicke vorbemessen werden kann, sind die Dicken von Stützkernplatten durch mehrere Faktoren nichtlinear bestimmt.

Die Gesamtdicke der Stützkernkonstruktion ist maßgeblich durch die Kernschicht vorgegeben, da die Deckschichten aus verstärkten Kunststoffen im Verhältnis zur Gesamtdicke klein sind. Die Dicke der Kernschicht wird durch wärme- und schalltechnische Anforderungen bestimmt, wobei Wabenkerne aufgrund ihrer höheren Festigkeiten und Moduln eine geringere Plattendicke hervorbringen als Schäume. Aus den genannten beeinflussenden Faktoren lassen sich demnach keine Angaben zur Vordimensionierung von Platten aus Stützkernkonstruktionen schlussfolgern. In Auswertung der realisierten Projekte aus der Tabelle lassen sich aber folgende Aussagen über die Dicke von Stützkernkonstruktionen für Plattentragwerke machen (alle TOdT 4.3.1.1):

- Für geringe Sützweiten bis ca. 3 m und mittlere Festigkeiten von Hartschäumen und glasfaserverstärkten Kunststoffen in den Deckschichten verwenden einige Entwerfer eine Plattendicke von $d = 1/50$ (Troisdorfer Kunststoffhaus 1959, Fertighaus Ludwig Doernach 1959, Stockbrae 1970, School in Frobisher Bay 1971, all-plastic house 1973).
- Im Beispiel des Heckel-Hauses 1971 mit 10 m Spannweite wird im Mittel ebenso $d = 1/50$ angewendet, die Schaumdicke verändert sich aber über die Länge entsprechend der statischen Beanspruchung.
- Mit Wabenkernen ausgeführte Plattentragwerke sind schlanker als solche mit Schäumen. Die verfügbaren, in ihrer Anzahl entsprechend wenig repräsentativen Beispiele zeigen jedoch diesen Trend. Das französische Schneckenhaus 1956 besitzt eine Schlankheit der Platte von $d = 1/125$, beim Solvay-Pavillon 1958 werden sogar $d = 1/260$ erreicht.
- Einen Sonderfall stellen die von Heinz Isler hergestellten Rippenplatten dar, die ungestützt 12 m Spannweite erreichen. Ihre Schlankheiten erreichen nicht die o.g. Werte, ihre Flächengewichte von $g = 0,30$ bis $0,45 \text{ kN/m}^2$ sind aber den Stützkernkonstruktionen mit Schäumen vergleichbar. Islers sehr ausgemagerte Rippenplatten bedingen zwar eine größere statische Höhe, sind aber von der Lichtdurchlässigkeit und ganz allgemein vom optischen Eindruck, trotz ihres beträchtlichen Aufbaus, ganz außergewöhnlich schön.

Das Tragwerk Platte aus FVK unterscheidet sich im Lastabtragungsverhalten nicht von Platten aus anderen Materialien. Als Besonderheit tauchen das Beulen der dünnen Deckschichten und das Problem der Fügung von Plattenteilen untereinander auf.

4.3.1.2 Zellen und Kabinen, Boxen

In der folgenden Kategorie werden alle für die Kunststoffentwicklung äußerst typischen kleinen Zellenstrukturen zusammengefasst. Diese Boxen bestehen aus Wänden, Decken und Böden die als Platten oder Scheiben tragen. Gemessen an den Möglichkeiten, die sich mit faserverstärkten Kunststoffen für Tragwerke aufboten, sind dies Beispiele von untergeordneter Bedeutung. Trotz dieser Tatsache fanden sie eine massenhafte Verbreitung, die sich durch das typische, heute noch unsere Erinnerung an die Kunststoffära prägende Design erklärt. Proportionen und die deutliche Ausprägung runder Ecken und Kurven zeichnen dieses Design aus. Im Vordergrund bei diesen Kleinstbauwerken standen Mobilität, Wetterfestigkeit, Medienresistenz, ungewöhnliches Design durch freie Formbarkeit und nicht die Tragfähigkeit.

Die Forschungsarbeit über Kunststoffhäuser und Raumzellen am IBK (1973) geht jedoch auf den Umstand ein, dass die auf den ersten Blick neuen Formen durch konventionelle Vorstellungen durchsetzt sind. Gerade Zellen und Kabinen sind dem Tafelbau entlehnt. Lediglich durch die Schwierigkeiten der Fügung von der waagerechten zur senkrechten Kraft- richtung entstanden die typischen Kunststoffformen. Die Situation wird nämlich bedeutend verbessert, „wenn man die Verbindung aus der Ecke herausnimmt, den Übergang von der Senkrechten zur Waagerechten in einem Stück ausführt und eine gut und einfach auszusteifende Verbindung erst in der Waagerechten [...] vornimmt“ IBK (1973), 33. Dieses Konstruieren von Tafelbauten aus der Ecke heraus findet vielfach Verwendung. Herstellungstechnisch am günstigsten ist ein Wandteil mit kurzem, angeformten Eckübergang, wie wir es vom fg 2000 kennen (Abb. 96).

Die Betrachtung der Spannweite scheint noch interessant, da in allen Fällen der Bereich um die 2,0 bis 2,50 m liegt. Eine

Größenordnung, die in den allermeisten Fällen ohne eine statische Berechnung zu realisieren war.

Mit den Zellen und Kabinen entsteht in der Geschichte der Tragwerke aus FVK ein Tragwerk, was sich weniger durch einen besonderen Lastabtrag als durch eine besondere Variante der Herstellung und Fügung und damit durch eine neue Form auszeichnet.

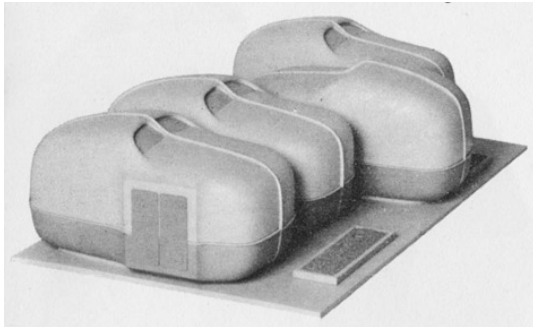


Abb. 105
Coulon-Schein-Zelle 1959
Schein (1959)

4.3.1.3 Faltwerke

Das Prinzip des Faltens einer ebenen Fläche zur Erhöhung der Steifigkeit und Überbrückung einer großen Spannweite ist ein äußerst geeignetes Prinzip für Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen. Im Gegensatz zu den Platten und Scheiben, wo nur Stützkernkonstruktionen anzutreffen sind, eignet es sich auch für einschichtige Konstruktionen. Es werden beachtliche Spannweiten zwischen 5 – 25 m erreicht, in Sonderfällen sogar 45 m. Die Flächengewichte von Faltwerken sind im Vergleich zu anderen Tragwerksgattungen meist sehr gering. Sowohl für ebene Faltplatten als auch als Bogen ausgeführte Faltwerke werden Flächengewichte zwischen $g = 0,05$ und $0,07 \text{ kN/m}^2$ erreicht, bei Spannweiten bis zu 25 m.

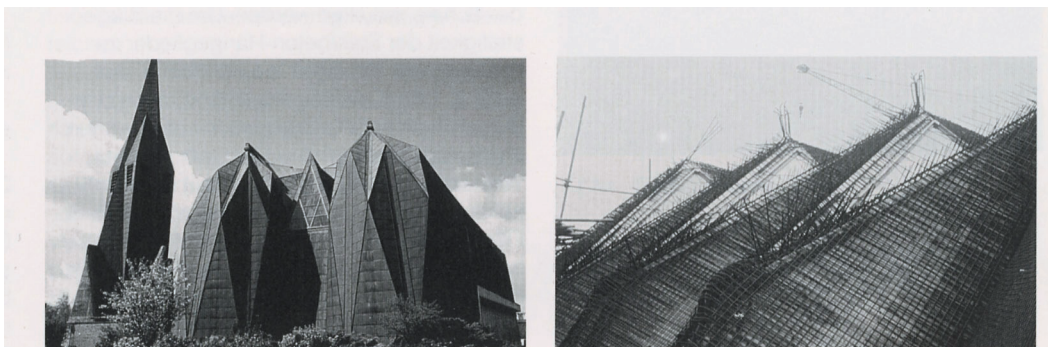
Das Verhältnis zwischen Tragvermögen und Konstruktionshöhe bei Faltwerken ist linear, ohne dass der Werkstoffaufwand ansteigt, wie *Hintersdorf (1972), 15* zeigt. „Damit wird es möglich, für Dachtragwerke freie Spannweiten von 18 – 24 m mit den gleichen Grundelementen zu erreichen, die, als Platte eingesetzt, nur 2 – 3 m stützenfrei überbrücken können.“ Eine weitere Erhöhung der freien Spannweite ist durch die Ausbildung von Rahmentragwerken sowie Schalen aus Faltflächen gegeben.

Durch die im freien Raum beinahe unbegrenzten Additionsordnungen von Einzelscheiben zu Faltwerken ergeben sich zahlreiche geometrische Formen. Verschiedene Verfasser haben versucht, diese Formenvielfalt, der wir überall auch bei den Faltwerken aus FVK begegnen, zu ordnen. Neben der Einteilung von *Engel (1996)* ist die Ordnung aus *Kunststoffüberdachungen (1972), 35* für die vorliegende Arbeit sinnvoll. Man unterscheidet:

- prismatische Faltung
 - a) einfache prismatische Faltung (Kanten verlaufen parallel zueinander)
 - b) gegenläufige prismatische Faltung (Wechselfaltung, Flächen haben dreieckigen Zuschnitt, Faltkanten verlaufen nicht parallel)
- pyramidische Faltung
(dazu zählen Polyeder-Faltwerke und Raumgitter-Flächentragwerke)

Faltwerke aus Beton und Kunststoffen:

Die Faltwerke aus FVK hatten einige Vorläufer in Beton. Mit dem gießbaren Werkstoff Beton ergab sich erstmals die Möglichkeit, flächige Tragwerke wie Faltwerke oder Schalen herzustellen. Durch die Kombination dieser beiden Tragwerkssysteme konnte man große Spannweiten überbrücken. Die Nähe zur Schale zeigt sich im Betonbau auch im theoretischen Handwerkszeug. Besonders *Craemer (1929)* bemüht sich in dem neu gegründeten Organ *Beton und Eisen* um Bereitstellung von Überschlagsformeln und Konstruktionshinweisen. Diese Veröffentlichung wirkt wie eine Initialzündung, bereits 1930 sind Faltwerke im Betonbau etabliert *Born (1964)*. Es entstehen Faltwerke von Saarinen, Stirling, Utzon und von den beiden berühmten spanischen Schalenbauern Eduardo Torroja und Felix Candela. Candela baut einige Faltwerke noch vor seinen Schalen zwischen 1947 und 1954. Bei einer Plattendicke von 10 cm ist die Spannweite seiner Faltwerke 15 m *Faber (1965)*. Er wendet sich später den hyperbolischen Schalen zu, die bezüglich Konstruktionsform, Lastabtrag und optischem Eindruck in nächster Nähe zu den Faltwerken anzusiedeln sind. Faltwerke aus Beton werden bis etwa 1964 gebaut. Sie erreichen Spannweiten zwischen 15 und 25 m, in Einzelfällen bis 38 m. Alle bedeutenden Faltragwerke aus FVK entstehen zwischen 1964 und 1971. Obwohl die Konstrukteure diese Tragwerksform erst spät (*Unidome 1962 Saechtling (1973), 502*) für sich entdecken, wird sie dank der umfassenden Arbeiten von Makowski und Huybers sowie deren Mitarbeiter schnell zu einem Meilenstein in der Geschichte der Tragwerke aus FVK. Nun entwickelten sich sehr eigenständige Faltwerke aus FVK, nämlich



1. Die aus gleichen vorgefertigten Teilen zusammengesetzten Faltwerke. Sie sind mobile Tragwerke im Gegensatz zum Betonbau (Abb. 110).
2. Die Raumgitter-Flächentragwerke. Sie werden aus vorgefertigten Pyramiden unter Zuhilfenahme von Stahlstäben zum Raumtragwerk (Abb. 107). Solche Tragwerke lassen sich noch aus Leichtmetall (Aluminium) herstellen. Beide Formen sind engsten mit dem Namen Z.S. Makowski verbunden, der diese Tragwerksform seit Beginn der 1960er Jahre untersucht. Mit seinen Forschungen *Makowski (7/1968), 11-22; Les Matières Plastiques (1959); Makowski (6/1969), 224* sowie den daran anknüpfenden von Huybers *Huybers (1973)* wird ein neuer, weil additiver Tragwerkstyp praxistauglich gemacht.

Die Forschergruppe um Z.S. Makowski am Battersea College, später Universität Surrey in London widmet sich schwerpunktmäßig diesen beiden folgenden Faltwerksgattungen:

1. Raumgitter-Flächentragwerke (Stressed skin space grid)

Durch die Verbindung der oberen Ecken der Pyramiden durch Rohre entsteht ein „Raumgitter-Flächentragwerk“ *Saechling (1973), 494*. Die Rohre können in 2 oder 3 Richtungen verlaufen (Zwei- oder Dreiwegegitter). Es werden eine Reihe von Berechnungsalgorithmen für diesen Tragwerkstyp entwickelt.

Im Stevin-Laboratorium an der Technological University in Delft finden sich später zwei Wissenschaftler, denen die Forschungen von Makowski, Gilkie, Robak, Benjamin und Piano so zukunftsreich erscheinen, dass sie die Raumgitter-Flächentragwerke noch intensiver untersuchen. Unter Leitung von A.J. Wildschut führen Pieter Huybers und weitere Mitarbeiter eine Reihe von Untersuchungen sowohl zu Tonnengewölben mit antiprismatischen Strukturen als auch zu Raumgitter-Flächentragwerken - die dort Raumgitter-Strukturen heißen - durch. Es werden Abhängigkeiten von Form des Dreieckselementes, Faltwinkel und Krümmung untersucht, wobei die gebauten Strukturen von Piano und Benjamin als Untersuchungsobjekte fungieren (Abb. 108, 109). Auch die theoretischen Arbeiten von Gilkie und Robak nutzt Huybers, um allgemeingültige Aussagen wie die folgende zu formulieren: Spannweiten von Raumgitter-Flächentragwerken mit unverstärkten Pyramiden erreichen bis zu 9 m, wobei die minimale Fläche der Pyramiden $0,60 \times 0,60$ m betragen sollte; mit Pyramiden aus FVK sind Spannweiten bis 20 m möglich. Huybers gebührt also das Verdienst einer Zusammenfassung, einer Angabe über die Leistungsfähigkeit solcher Tragwerke. Seine theoretischen Forschungen untermauert Huybers mit diversen realisierten Tragwerken, darunter die Überdachungen aus Raumgitter-Flächentragwerken in Delft, Den Haag und Arnhem 1970 (Abb. 47, 48 und 107). Er erreicht mit einlagigen Pyramiden der Grundfläche $1,0 \times 1,0$ m die Spannweite von 9 m, bei einem Prototyp unter Versuchsbedingungen erreicht er sogar 25,70 m Spannweite, die größte für diesen Tragwerkstyp (Abb. 51) *Huybers (1972), 213*.

Abb. 107

Canopy roof in Arnhem *Huybers (1972), 38*

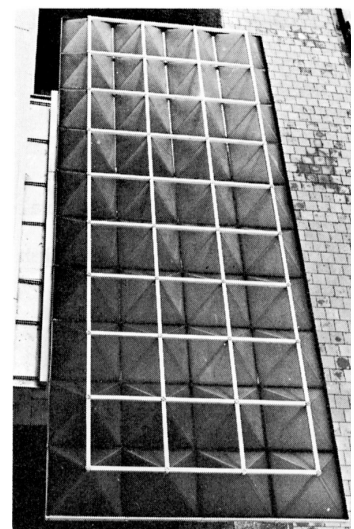


Abb. 106a, 106b (gegenüber)

Kirche in Neuss (1967), Ing.: S. Polónyi. Das Faltwerk wird vor Ort fugenlos hergestellt
Kind-Barkauskas (2001)

2. statisch bestimmte Faltwerke (Tonnengewölbe, Dreigelenkrahmen)

Den Beweis, dass Faltwerke eine ideale Tragwerksform für FVK sind, erbringt unter anderem Renzo Piano mit seiner Schwefelgewinnungsanlage in Pomezia (Nähe Rom, Abb. 15). Hier kommt eine positive Eigenschaft des FVK, die Medienresistenz voll zur Geltung. Im Vergleich zu anderen Tragwerken erreicht Piano eine große Leichtigkeit ($g = 0,04 \text{ kN/m}^2$). Zudem wurde die Halle aus identischen Rhomben mit angeformten Flanschen im Niederdruckverfahren hergestellt und ist sehr wirtschaftlich gegenüber herkömmlichen Materialien.

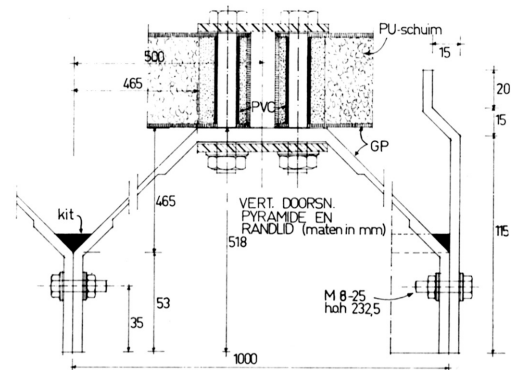
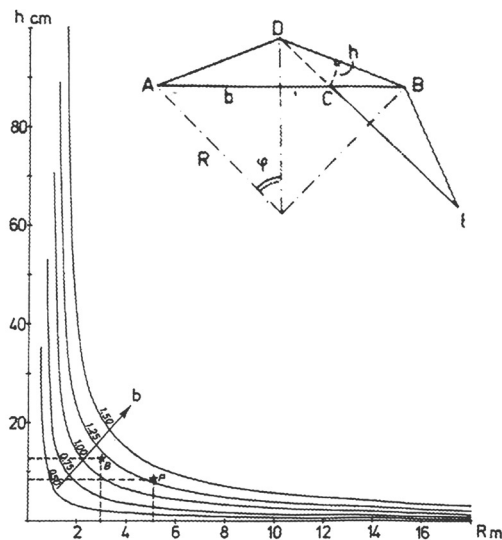


Abb. 108 (links)

Relation of minimum structural depth and radius of curvature for various elements lengths Huybers (1972), 55

B und P bezeichnen die Tragwerke von Benjamin und Piano

Abb. 109 Specific cross section of construction details for canopy roofs Huybers (1972), 39

Die Forschungen der Gruppe um Z.S. Makowski in London erwirken eine deutlich höhere Entwicklertätigkeit herstellender Firmen, als anderswo. Hier sind im Besonderen die Firmen Mickleover Transport Ltd., BP Plastics, Scott Bader Services Ltd., Fibron, Fa. Anmac Ltd. Nottingham, Formplus Co. of Quarry Bank, Staffordshire und infolge des regen Austausches zwischen Renzo Piano und seinem Bruder die Mailänder Firma Resine Prodotti Derivati (RPD) zu nennen. Die Schwimmbadüberdachungen der Fa. Scott Bader 1970 sind ein solches Produkt, was ohne die Arbeiten von Makowski und Co. nicht in Serienreife hätte produziert werden können. Die Firma hatte sich mit ihrem eigenen Lagerhaus bereits 1968 an einfache Faltwerke herangewagt. Auch mit Mickleover Ltd. und British Railways bestanden zwei Firmen in England, die sich um die Einführung von FVK als tragenden Werkstoff äußerst verdient gemacht haben. British Railways hatte mit dem Architekten Arthur Quarmby von 1959 bis 1964 einen geeigneten Partner gefunden, der sich weniger um futuristische Architektur als um tatsächliche nötige Bauten, wie die vielfach eingesetzten Relay Rooms kümmerte. Die Firmen kamen zum überwiegenden Teil aus dem Fahrzeugbau.

Festzustellen bleibt, dass in Großbritannien durch die Verbindung einiger herausragender Forscher, wie Z.S. Makowski und Arthur Quarmby, mit einer sowohl erfahrenen, als auch vorwärts strebenden Industrie die Gelegenheit entstanden war, neuartige Tragwerke in Serienreife und damit rentabel auf den Markt zu bringen. Hier ist ganz deutlich die Einheit von Experiment, theoretischer Untermauerung und finanzieller Unabhängigkeit der Auftraggeber für eine positive Bilanz entscheidend gewesen.

Eine kleine Gruppe innerhalb der Faltwerke stellen die Polyeder-Faltwerke dar (Abb. 111). Ursprünglich in dieser Arbeit bei der Tragwerksgattung „Boxen“ eingeordnet, zählen sie laut Engel (1997) zu den Faltwerken, tragen also Lasten vornehmlich über Membrankräfte ab. Dies kann für die hier aufgeführten Beispiele nicht in jedem Falle gelten, häufig wird aufgrund der geometrischen Verhältnisse, z.B. der zu flachen Neigung der Faltfläche eine Biegebeanspruchung wirken. Um die Vergleichbarkeit der Tragwerks-Spannweiten denen von Heino Engel gegenüberzustellen, erfolgt die Einordnung hier.

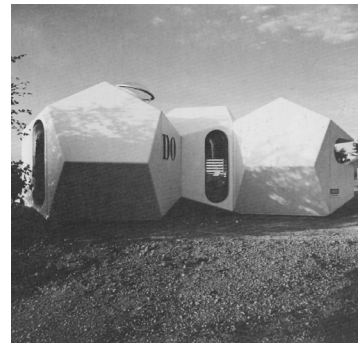
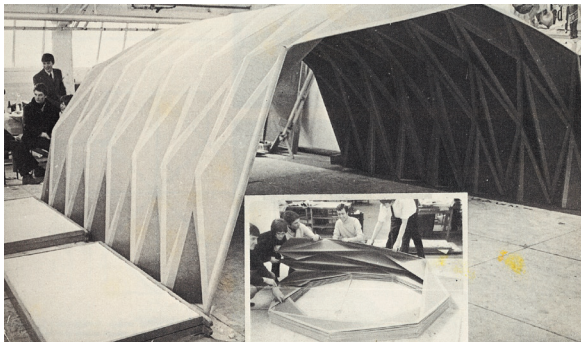


Abb. 110 links und 111
strukturelle Untersuchungen zu faltbaren Tonnengewölben stellte auch *Quarmby (1974), 81* an
ein typisches Polyeder-Faltwerk ist das Do-System der Architekten Hübner, Huster und Häusermacher
Doernach (1974), 50

Zusammenfassung:

Faltwerke zählen zu den bedeutendsten Tragwerken aus FVK. Im Gegensatz zu ihren Verwandten aus Beton erreichen sie zwar nur geringere Spannweiten, ihre Herstellungstechnik und die Möglichkeit der Bildung von leichten modularen Raumstrukturen aus kleinsten Elementen, macht sie für andere Anwendungen dennoch rentabel. Gegenüber Raumstrukturen aus Leichtmetallen haben sie den Vorzug, durchscheinend und medienresistent zu sein. Man kann die Grenze von Faltwerken aus einlagigen FVK mit ca. 25 m bestimmen, größere Spannweiten sind nur im Versuch erreicht worden. Mit Hypar-Schalen erreicht man etwas größere Spannweiten, ca 30 m, die optische Aussage ist von den Faltwerken in diesem Falle kaum zu unterscheiden. Auch das Lastabtragungsverhalten der beiden eben genannten Tragwerke ist kaum zu unterscheiden. Will man Flächentragwerke wirtschaftlich ausbilden, so „wird eine Wanddicke kaum über 3 mm betragen.“ *Polónyi (14/1969), 22* Davon ausgehend ist den Faltwerken gegenüber den Schalen der Vorzug zu geben. Dies hängt in erster Linie mit den Aufwendungen zusammen, die für die Herstellung, also die Schalungsform, zu machen sind und nicht mit dem Tragverhalten. Im einfachsten Vergleich einer einachsigen Falte mit einer einfach gekrümmten Tonnenschale ergibt sich bei gleicher Spannweite, Stichhöhe und Querschnitt ein vergleichbares Tragverhalten, beschrieben durch Größe und Richtung der Hauptspannungen sowie Stabilitätsverhalten (Beulen). Faltwerke aus ebenen Elementen sind aber weniger aufwendig herzustellen.

4.3.2 Flächige Tragwerke aus gekrümmten Flächen

Gegenüber ebenen Flächentragwerken tragen gekrümmte flächige Tragwerke ihre Lasten durch Kräfte parallel zur Schalenmittelfläche ab. Schalen erreichen somit sehr dünne Wanddicken und können einlagig ausgeführt werden. Mit FVK lässt sich praktisch jede beliebige Schalenform herstellen.

Ähnlich wie bei den Faltwerken wurden auch die **Schalenformen** durch **gebaute Vorbilder** aus dem **Betonbau** bestimmt. 1922 erhielt Walter Bauersfeld das Patent zur Errichtung von Kuppeln aus Beton, 1935 entstand in Madrid die Überdachung der Pferderennbahn Zarzuela durch Eduardo Torroja und um 1955 begann Felix Candela mit seinen hyperbolischen Schalen. Die Moderne ist seit ca. 1930 durch le Corbusier und Frank Lloyd Wright und den rechten Winkel geprägt, doch gekrümmte Schalenformen und rechte Winkel existieren verträglich nebeneinander. Nach dem 2. Weltkrieg wird Stahlbeton zum Massenbaustoff. Dafür ist vor allem der günstige Rohstoffpreis ausschlaggebend. Auch Betonschalen werden in nicht geringem Umfang gebaut und die Errichtung eines Schalentragwerks zum Ziel eines ehrgeizigen Ingenieurs erhoben. „In the Sixties of the 20th Century (1950-1960) shell structures were very popular and well used. Many famous structures were built in France, Italy, Holland, Belgium, Switzerland, Spain, England, USA and other countries. [...] At that time the dream of every engineer was to build at least one bridge and one shell in his lifetime. Books were full of present and future shell projects.“ *Isler (2003), 48*. Eines der Idole des Schalenbaus dieser Zeit war Eduardo Torroja, der 1959 das Kolloquium in Madrid einberief, auf das sich Heinz Isler hier besinnt. Während dieses Kolloquiums wird die IASS, die International Association for shell structures, gegründet. Sie wird sich in den folgenden Jahren auch immer wieder um Schalen aus FVK und deren Publikation bemühen. Unter dem Dach dieser Organisation erfahren die Betonschalenbauer

auf vielfältige Weise von den Aktivitäten der Kunststoff-Schalenbauer, z.B. auf der „World Conference on Shell Structures“, 1962 von *Hossdorf (1962)*, *Dietz (1962)* und anderen. Hier hätte auch Felix Candela von der hervorragenden Eignung seiner hyperbolischen Schalen aus Beton für die Ausführung in Kunststoffen erfahren können *Saechtling (1973)*, 504. Candela hat sich aber nicht von seinem Werkstoff, dem Beton abbringen lassen. Wohl auch, weil er in Mexiko seine Schirmschalen so billig herstellen konnte (12 €/m²), dass sie um die Hälfte günstiger waren als eine vergleichbare Blechabdeckung *Faber (1965)*. Hätte er dies auch mit Kunststoffen erreicht und hätte er in Mexiko eine entsprechende Firma gefunden? Das man in Mexiko Firmen finden konnte, die mit der Herstellung von Tragwerken aus FVK vertraut waren, beweist das Mujeres Ferienhaus (TODT 4.3.1.3-1968/03), ein Faltwerk-Bungalow von Juan Jose Diaz Infante, 1968 in Mexiko City hergestellt *Kunststoff-Überdachungen (1972)*, 38. Viele großartige Schalenkonstrukteure interessierten sich nicht für den FVK, vermutlich nicht aus Berührungsängsten, sondern weil Ihnen dieser Werkstoff ästhetisch nicht zusagte. Die einzige Ausnahme stellt Heinz Isler dar. Als Betonschalenbauer war er ein Individualist, geometrisch beschreibbare Schalenflächen interessierten ihn nicht. Er ist auch der einzige Vertreter, der im gleichen Maße den Schalenbau aus Beton als auch aus faserverstärkten Kunststoffen praktizierte. Islers Oberlichter sind die ersten Kunststoffschalen in Europa. Sie entstehen zu einer Zeit, als auch die baustatischen Gleichungen zu deren Bemessung, die landläufig „Schalenstatik“ oder „Schalenliteratur“ genannt werden, in ausreichendem Maße vorlagen. Auch hier hatte der Betonschalenbau Wissen hervorgebracht, auf das man sich stützen konnte. Nach dem 2. Weltkrieg wurde die Schalentheorie umfassend dokumentiert und stand so auch den Kunststoffschalenbauern zur Verfügung. Als wichtige Vertreter der Schalentheorie sind hier zu nennen: *Born (1960)*, *Flügge (1957)*, *Thimoschenko (1959)*, *Girkmann (1959)*. Dass diese Schalenliteratur für die Bemessung der FVK-Schalen genutzt wurde, ist in zahlreichen Fällen nachweisbar *Dieterich (1967)*, *Home (2002)*, *Isler (1970)*. Erste eigenständige Bemessungen für Schalen aus FVK sind mit *Hintersdorf (1972)* erschienen. Die Baustatik der Schalen gilt für alle Werkstoffe gleichermaßen, Eigenständigkeiten konnten also nur auf Seiten der Werkstoff-Widerstände und wie man noch sehen wird, auf Seiten der gültigen Lastannahmen herausgearbeitet werden.

In ihrem **Trag- und Stabilitätsverhalten** unterscheiden sich die Schalen aus FVK grundlegend nicht von den Betonschalen. Aus gleichförmig verteilter Belastung entstehen Normalspannungen sowie Schubspannungen in der Schalenmittelfläche. Wie bei der Betonschale sind sie relativ gering, so dass nur eine geringe Schalendicke erforderlich ist. Unter Druckspannung wird die Schale ausbeulen wollen. Infolge der geringen Schalendicken, der hohen Zug- und Biegefestigkeiten jedoch dem kleinen E-Modul des Materials FVK hat der Nachweis des Stabilitätsversagen gegenüber dem Festigkeitsversagen höhere Priorität im Vergleich zum Schalenbetonbau. Die Beulformel unterscheidet sich hingegen nicht. Als Orientierung kann hier die von den Pionieren angesetzte Scheitelgleichung genannt werden, die jedoch die komplizierten Randstörungen nicht berücksichtigt.

$$p_{\text{krit}} = \alpha \frac{E \times d^2}{R_1 \times R_2}$$

mit

α	Beulfaktor
E	E-Modul
d	Schalendicke
R_1 und R_2	Hauptkrümmungsradien in dem gefährdeten Punkt



Abb. 112
Versuchsschale aus Beton für Carl-Zeiss-Jena, 1932
doppelt gleichsinnig gekrümmte Schale, beulgefährdet
Schlaich/Heinle (1996), 184

Der Beulfaktor α ist abhängig von der Schalenform und deren Randbedingungen und hat verschiedene Autoren, sowohl im Betonschalensbau als auch im Kunststoffschalensbau, über Jahre hinweg zu diesem Faktor forschen und experimentieren lassen. Anhand der Beulformel lässt sich ausmachen, welche Möglichkeiten es zur Erhöhung der Stabilität gibt. Die Erhöhung der Schalendicke, zwar quadratisch eingehend, ist jedoch kein probates Mittel. Zu überprüfen bleibt, ob dies alle Kunststoffkonstrukteure erkannt haben. Bekannt war ihnen die Problematik in allen Fällen. In der Kunststoffliteratur sind Veröffentlichungen zur Beulproblematik seit Mitte der 60er Jahre vorhanden *Polónyi (14/1969)*, 24. Polónyi empfiehlt, die kritische Last durch Erhöhung der Krümmungsradien zu verbessern. Dies geht erst einmal durch Erhöhung der Stichtiefe, und wenn dies aus geometrischen Gründen begrenzt ist, so soll man versuchen, die Beulung durch eine sekundäre Form zu verhindern. Dieses Entwurfsprinzip wurde auch in vielen Fällen bei den synklastischen Schalen angewendet, so von Heinz Isler bei den Klimakammern (1956) und der Kläranlage (1956, Abb. 114) und später bei seinem Projekt für einen Dom (1969), von Bertolotti (1959) beim Snia Viscosa System, bei den Gewächshäusern von G. Hintersdorf (1969), beim RP Dome (1960), auch bei Buckminster Fullers Fly's Eye (1965) (alle TÖD'T 4.3.2.2). Typische Beispiele sind auch die sternförmig zusammengesetzten Kuppelschalen von Stephan Du Château – dem Markt in Argenteuil (1967) und der Markthalle St. Ouen 1968 oder die 1970 in Oakland erbauten Space Shell. In zahlreichen Beispielen lässt sich dieses Prinzip auch im Betonschalensbau verfolgen, so bei der Markthalle in Royan von René Sarger in Frankreich (Abb. 113).

Während das Tragverhalten von FVK-Schalen ähnlich dem von Betonschalen ist, wurde anfangs auch bei der Bemessung der FVK-Schalen ähnlich wie im Betonbau verfahren. Die ersten gravierenden Unterschiede zwischen Beton- und Kunststoffschalen zeichnen sich in der **Herstellung** ab.

Die ersten aller Kunststoffschalen, die Oberlichter von Heinz Isler 1956, sind noch aus einem Stück gefertigt. Mit ihren maximal 7 m Durchmesser wäre Isler gar nicht auf die Idee gekommen, die Schale aus mehreren Teilen zu fertigen. Aber schon bei einem folgenden Projekt kommt er um eine solche Teilung nicht umhin (Abb. 115, 116). „Wegen des Strassentransportes ist die ab Werk lieferbare Kuppelgröße auf 5 m beschränkt. Deshalb wurde bei größeren Durchmessern die Form zerlegbar angefertigt und zur Baustelle transportiert.“ *Isler (1977)*, 14. In der Folge lassen sich kaum noch Schalenkonstruktionen nachweisen, die aus einem Stück gefertigt werden. Unter den synklastischen (doppelt gleichsinnig gekrümmten) Schalen findet sich unter den Schalen zwischen 1956 und 1974 keine einzige, die nicht aus Segmenten zusammengesetzt ist. Bei den antiklastischen (doppelt gegensinnig gekrümmten) Schalen, die zwischen 1957 und 1974 entstehen, verhält es sich ebenso. Warum ist das so? Warum werden die Betonschalen mit einer Form geschalt, während Kunststoffschalen aus mehreren identischen Teilen zusammengesetzt werden? Dies hat in erster Linie mit dem Ort, an welchem die Tragwerke geschalt werden, zu tun. Wie etwas später in diesem Kapitel noch zu erfahren ist, sind fast alle Tragwerke, also auch Schalen aus FVK, vorgefertigt, also nicht wie die Betonschalen am Ort ihres Verbleibens hergestellt. Die Schalengröße wird demnach schon aus Transportgründen begrenzt, was auch den Formkosten entgegenkommt. Schaut man sich die gebauten Beispiele syn- und antiklastischer Schalen aus FVK an, so sind es zum großen Teil Tragwerke für Bauten, die aus ihrer Verwendung heraus transportabel oder mobil sein müssen. Die Klimakammern der Schweizer Armee von Heinz Isler (1957), mussten durch Kellergänge in ein Gewölbe verbracht werden, der Polar Iglu (1957) musste unter arktischen Bedingungen schnell errichtbar sein, die mobilen Ferienhäuser Futuro und Rondo (1968) sollten umsetzbar sein und so lässt sich die Liste beliebig fortführen.

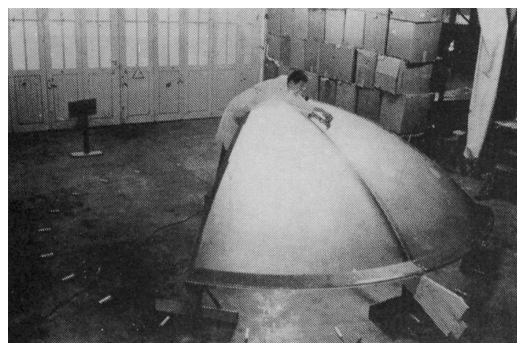
Festzustellen bleibt, dass aus den Anforderungen der frühen 1960er Jahre an das mobile Bauen der Werkstoff Glasfaserpolyesterharz entdeckt wurde und damit die Teilung der Schalen in identische Einzelelemente einhergeht. Der Schalenbau aus FVK emanzipiert sich vom Betonschalensbau durch die eindeutig mobile Ausrichtung der Bauwerke. Schalentragsysteme stellten sich als besonders geeignet heraus, aufgrund ihrer großen Schlankheit und der einhergehenden Gewichtseinsparung, für das mobile Bauen war dies ein wesentliches Kriterium.

Die Schalen aus Kunststoffen hatten somit in den Betonschalen keine Konkurrenz. Weder waren diese leicht noch lassen sich mit ihnen lösbare Verbindungen ohne weiteres herstellen. Die Fügung aus Einzelteilen, die sogenannte Skelettbauweise ist typisch für den Holz- und Stahlbau und nicht für den Betonbau. Die Konkurrenten waren also die Skelettbaumaterialien Holz und Metall. Von den Metallen eignet sich nur Leichtmetall, insbesondere Aluminium, als Baumaterial für solche mobilen Bauten. Ein Beispiel hierfür ist das dem Kunststoffkugelhaus von Egon Prüttsch (1960, Abb. 117) äußerlich sehr ähnliche Aluminium-Kugelhaus von R. Walter von 1957 *Walter (1957)* (Abb. 118). Hier kämpften Aluminium und Kunststoff um gleiche Märkte, Aluminium als Baumaterial für solche mobilen Wohnbauten bleibt ein Konkurrent, wie dies schon bei



Pyramiden für die Raumgitter-Flächentragwerke zu konstatieren war (Abb. 42, 43). Der Werkstoff Holz als ältestes Baumaterial überhaupt, hatte Mitte des 20. Jahrhundert bereits eine längere Anwendungsgeschichte für Kuppeln zu verzeichnen. Das älteste erhaltene Kuppelbauwerk aus Holz ist der 691 n. Chr. gebaute Felsendom in Israel *Schlaich/Heinle (1998), 164*. Eine tatsächliche Schalentragswirkung, nämlich eine Verteilung der Membrankräfte in allen Richtungen der Mittelachse ist hier noch nicht festzustellen. Zahlreiche Holzkuppeln lassen sich jedoch während der Zeit der Kunststoffschalen zwischen 1957 und 1975 nachweisen. Beispielsweise baute Polónyi 1966 eine Hyparschale aus Holz auf einem Quadratgrundriss von 33 m für die Kirche St. Pius in Krefeld *Natterer/Herzog/Volz (1991), 262*. Auch Buckminster Fuller stellte neben seinen Kunststoffkuppeln in geodätischer Bauweise auch solche aus Holz her, darunter sein eigenes Wohnhaus „Home Dome“ *Krausse (1999), 366*. Kunststoff-Schalen verwendete man überall dort, wo man einen „unverrottbaren“ und lichtdurchlässigen Werkstoff wünschte. Für Schwimmbäder, Gewächshäuser und Silos setzte sich daher der FVK als kostengünstig zunehmend auch gegen seinen Konkurrenten Holz durch.

Während sich die FVK-Schalen aufgrund ihrer Eignung für das mobile Bauen von den Betonschalen emanzipierten, entwickelte sich keine eigenständige Technik der Fügung der FVK-Schalenteile. Das **Verbinden** der einzelnen **Schalenteile** bleibt von den Skelettbauweisen des Stahl- und Holzbaus bestimmt. Da der Kunststoffschalenbau aber von der Mechanik der Kräfte kein Skelettbau ist, werden die Verbindungen nie zufriedenstellend gelöst. Das übliche Verbindungsprinzip war eine Abkantung der Schalenteile und eine Schraub- oder Nietverbindung. Daraus ergeben sich zwei wesentliche Nachteile. Erstens wird das Material durch die Verbindung nicht mehr flächig sondern punktförmig belastet und kann dadurch schnell versagen, zweitens werden die Schalennormalkräfte aus der Schalenmittelfläche umgelenkt, die Membranwirkung wird also partiell zerstört. In drei der aufgeführten Schalen lässt sich ein anderes, flächigeres Verbindungsprinzip der Schalenteile feststellen. Renzo Piano klebt seine Schalenteile für die XIV. Triennale in Venedig 1967 vor Ort über freiem Grundriss zusammen und ist damit, wie auch bei der Konstruktion seiner Dachflächen aus gleichen Pyramiden oder bei seinen zugbeanspruchten Tragwerken, seinen Zeitgenossen weit voraus (Abb. 72, 73) *Compagno (1991), 17*. Buckminster Fuller fügt die Elemente der Fly's Eye zwar über Metallbolzen punktuell zusammen, verzichtete aber bei den Kuppeln kleineren Durchmessers, auf die Aufkantung (Abb. 88). Die Schalenkräfte werden also nur geringfügig auf den kleineren Querschnitt umgelenkt. Heinz Hossdorf verzichtet bei seiner Schirmkonstruktion für die Expo '64 in Lausanne ebenso wie Piano auf Schrauben und Aufkantungen. Er klebt die Hypar-Schirmflächen auf die Randprofile aus Stahl. Das unterschiedliche Temperatur- und Verformungsverhalten der beiden Werkstoffe testet er in Versuchsreihen und findet die geeignete Klebverbindung. (siehe Anhang und 3.2.2 und 4.3.3).



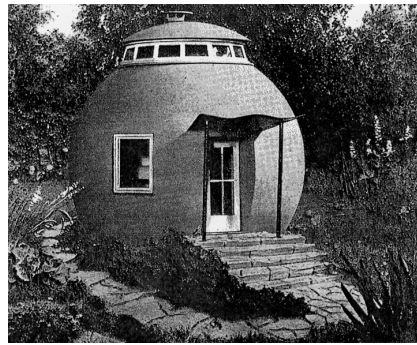


Abb. 117 (links) und 118
Kunststoffkugelhaus von Egon Brütisch
Schwabe (8/1969), 412
Aluminium-Kugelhaus von R. Walter 1957 *Walter*
(1957)

Spannweiten:

Neben den Faltwerken und den Stabwerkskuppeln erreichen die Schalen die größten **Spannweiten** für Tragwerke aus FVK. Für die am häufigst vertretenen synklastischen Schalenformen lassen sich 20 m als Grenze ausmachen, antiklastische Formen erreichen 28 m. Für die abwickelbaren Schalen sind 10 m die Grenze, einseitig eingespannte Kamine besitzen eine Höhe bis zu 60 m, die Wanddicken dieser Zylinderschalen verdicken sich zur Einspannstelle hin.

Einige Verfasser gaben in den 1960er Jahren die Spannweiten für Schalen aus FVK mit hoffnungsvolleren Werten an. *Makowski* (6/1969), 226 äußert sich aufgrund theoretischer und praktischer Erfahrungen wie folgt: „Wegen der außerordentlichen Leichtigkeit des Materials können einschichtige, membranartige Konstruktionen des antiklastischen Formentyps aus glasfaserverstärktem Kunststoff ohne Schwierigkeiten Spannweiten von 25 bis 30 m erreichen. Sandwichkonstruktionen können - abhängig von ihrer Dicke - ökonomische Spannweiten bis zu 60 m überdecken. Aufgrund theoretischer Überlegungen können zellulare, zweischichtige Kunststoffkonstruktionen bei Verwendung des derzeit gebräuchlichen Materials Spannweiten bis zu 90 Metern ohne Schwierigkeiten überwinden.“

Abb. 113 und 114 (gegenüberliegende Seite oben links und oben rechts)

Sekundärkrümmungen der Schalenteile waren sowohl im Beton- als auch im FVK-Bau zur Stabilisierung nötig. links: Markthalle von Royan aus Beton www.structurae.de, rechts: Abdeckung für Kläranlage von Heinz Isler aus GFK *Fomekk* 2002

Abb. 115 und 116 (gegenüberliegende Seite unten links und unten rechts)

ungeteilte 8 m messende Oberlichtkuppel und größere, in Achtel geteilte Oberlichtschale von Heinz Isler *Isler* (1975)

SCHALEN



synklastische



Kuppeln = Kugelkalotte



Elipsoide



eliptische Paraboloid



Rotationsparaboloid



antiklastische = Sattelfläche



hyperbolische Paraboloid = Hypar



Rotationshyperboloid



Conoid



einsinnig gekrümmte



Tonnenschale



Kegelschale



Zylinderschale

elliptische Kegel

Kreisegel

Kreis

elliptische Zylinder

hyperbolische Zylinder

parabolische Zylinder

Auswertung der Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ für Schalen

Eine sinnvolle Einteilung der Schalen wurde bereits unter 4.1 erläutert. Die Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ verzeichnet 250 Tragwerksbeispiele, wovon 93 Schalen sind, dabei verzeichnen 74 Projekte eine tatsächliche Schalentragwirkung, also Membrantragwirkung. Es sind

- 9 Abwickelbare Schalen (Tonnen)
- 33 Synklastische (doppelt gleichsinnig gekrümmte) Schalen
- 16 Antiklastische (doppelt gegensinnig gekrümmte) Schalen
- 12 Schirme aus gekrümmten Schalenflächen, davon sind 2 zugbeanspruchte
- 4 Freiformen und
- 19 biegebenspruchte Schalen, die vornehmlich nicht über Membrankräfte, sondern Biegung Lasten abtragen.

Die einzelnen Schalentypen verzeichnen einige Besonderheiten, die nachfolgend dargestellt werden.

4.3.2.1 Einsinnig gekrümmte Schalen (Tonne, Zylinder, Kegel):

Aus der Tabelle ergibt sich folgendes Bild:

- sie wurden erst sehr spät angewendet (1969)
- im Hochbau wurden sie kaum angewendet
- sie eroberten sich zunehmend Raum im Industriebau – Tanks/ Behälter, den sie bis heute beanspruchen. Vornehmlich Zylinder stehend oder liegend, Industrietanks kaum publiziert
- nach *Saechtling* (1973), 473:
Herstellung mittels verschiedener Verfahren, am häufigsten verwendet wurde das Wickelverfahren für Behältervolumen von 2000 l bis 100.000 l. Bei Tanks die Dauerfestigkeit genau zu überprüfen, denn die Behälter halten dauernden Lastwechseln stand. Sie wird mit 35 bis 50 % der Kurzzeitfestigkeit angegeben.
- übliche Spannweite: Röhrendurchmesser von 2 bis 6 m, im Behälterbau bis 15 m

Besondere Tragwerke innerhalb der abwickelbaren Schalen stellen die Kamine oder Abzugsschornsteine dar. Sie werden aus einzelnen Ringsegmenten hergestellt, deren Wandungsdicke nach unten hin, also zur Einspannung hin, beträchtlich zunimmt. Für den Abgaskamin der BASF Ludwigshafen 1968 mit 45 m Höhe, sind im unteren Teil 20 mm Dicke nötig, die sich oben auf 10 mm verjüngen *Saechtling* (1972), 204. Im Bereich der Einspannung werden zur Übertragung der Querkräfte sogar 50 mm nötig. Die Verbindung der einzelnen Zylinderrohrabschnitte zeigt Abb. 132 und Abb. 133.

Ein Beispiel für die Anwendung industrieller Herstellungsverfahren für nichtindustrielle Anwendungen zeigt das Röhrenhaus Dutler. 1969 vom Schweizer Architekten Dutler entwickelt und von Heinz Isler detailliert bemessen, reiht es sich mühelos in die Reihe der in der Hochphase 1968/69 entstandenen Ikonen des Kunststoffbaus ein. Aufgrund der Nutzung einer für Silos vorgesehenen Wickelanlage konnte es vergleichsweise günstig hergestellt werden, fand aber trotzdem keinen Markt für die Serienfertigung (siehe Anhang).

Spannweiten:

Die ausgeführten Beispiele zeigen eine Spannweitenbegrenzung für zweifach gestützte liegende Zylinderschalen von $l = 10 \text{ m}$, vorausgesetzt die Schale ist durch Endscheiben stabilisiert. In der damals gebräuchlichen Literatur sind die erreichbaren Spannweiten folgendermaßen angegeben *Hintersdorf* (1972), 20: „Die Spannweitenrichtung liegt in Richtung der Krümmungsachse und es sind bei 1mm dicken faserverstärkten Platten Lichtwände mit 3 ... 4 m freien Stützweiten zu realisieren. Bei Anwendung des Stützkernprinzips lässt sich das Einsatzgebiet solcher Schalen wesentlich erweitern.“

4.3.2.2 Synklastische Schalen

aus der Tabelle ergibt sich folgendes Bild:

- mit einer synklastischen Schale beginnt die Entwicklung des Bauens mit FVK in einer Tragstruktur (Kuppelschale von Heinz Isler (1956))
- häufig angewendete Konstruktionsform, 33 Beispiele
- einteilig nur für kleine Spannweiten/ Radien bis ca. 5 m, darüber hinaus in allen Beispielen in identische Segmente geteilt
- Spannweiten ab 2 m, max 20–25 m, ein Projekt für einen 30 m Dom wurde nicht realisiert
- bei einschaliger Anwendung sind extrem leichte Beispiele, ca. $g = 0,05 \text{ kN/m}^2$ zu verzeichnen
- Erhöhung der Stabilität von flachen Schalen häufig durch sekundäre Krümmung (siehe Ausführung oben)

Spannweiten:

„Mit 1... 2 mm dicken glasfaserverstärkten Plasten sind hier freie Spannweiten bis zu 12 m und mehr möglich. Bei Anwendung der Stützkernbauweise lassen sich sogar mit nur 3 mm dicken Deckschichten Rotationsschalen mit Durchmessern von 100 m verwirklichen.“ *Hintersdorf (1972)*, 2 Die tatsächlich realisierbaren Spannweiten sind jedoch geringer, Beispiele über 20 m Spannweite lassen sich nicht nachweisen. Hierfür sind als Grund in erster Linie die Möglichkeiten bei der Herstellung zu nennen. Spannweiten von 100 m und mehr lassen sich nicht mehr im Handverfahren und nur über größere Elementierung realisieren. Vorstellbar wären solche Tragwerke z.B. als Addition von doppelt gekrümmten, radial angeordneten und als Stützkernkonstruktion ausgeführten Kuppelschalen, der Form entsprechend der Markthalle St. Ouen (1968, Abb. 30). Ebenso realisierbar und auch umgesetzt wurden Kuppelschalen dieser Größenordnung als Stabwerkskuppeln.

4.3.2.3 Antiklastische Schalen

Antiklastische Strukturen sind bereits seit 1879 in Anwendung. *Zerning (1972)*, 1 zeigt die erste Anwendung einer hölzernen HP-Fläche für die Segel einer Windmühle mit 21,64 m Auskragung. Auch Gaudi verwendete HP-Schalen für seine Sagrada Familia in Barcelona. Einige französische Ingenieure, namentlich Bernard Lafaille und F. Aimond bauten Mitte der 1930er Jahre HP-Schalen. Eduardo Torroja realisierte HP-Schalen für die Überdachung der Pferderennbahn La Zarzuela in Madrid 1935. Der größte Meister antiklastischer (Beton)-Schalen wurde der Spanier Felix Candela in Mexiko.

aus der Tabelle ergibt sich folgendes Bild:

- Aufgrund ihrer höheren Steifigkeit gegenüber dem synklastischen Schalentyp eignen sich antiklastische Typen noch besser für Schalen aus einschichtigen Kunststoffen. Von den aufgeführten Beispielen sind mehr als 60 % einschichtige Konstruktionen, die zwischen 1,6 und 3,2 mm dünn sind bei einer Spannweite von 7 bis 15 m. Mit Stützkernkonstruktionen wurden Spannweiten bis zu 20 m im Durchmesser gebaut.
- Es sind dies die Schalen mit der größten Beulsteifigkeit, gemessen am Materialaufwand.
- Hyperbolische Paraboloiden lassen sich rationell herstellen, da die Erzeugende ihrer Schalenfläche eine Gerade ist und demzufolge die Schalung aus geraden Brettern oder gespannten Seilen hergestellt werden kann. Bestes Beispiel für die einfache Herstellbarkeit sind die im Sprühverfahren (Cocooning-Verfahren) hergestellten Formen (Abb. 119, 120).
- Antiklastische Schalen lassen sich aufgrund ihres guten Steifigkeitsverhältnisses sehr dünn herstellen, Flächengewicht von ca. $g = 0,05 \text{ kN/m}^2$ sind keine Seltenheit.
- Vielfach zu beobachten sind Tragwerke, die sich aus kleineren vorgefertigten antiklastischen Flächen zusammensetzen. Besonders in England und Amerika waren diese zusammengesetzten Hallentragwerke beliebt. Ihre Nähe zu den Faltwerken ist der Grund, warum sich auch Makowski mit dieser Tragwerksform eingehend befasste. Schwimmbadüberdachungen wie die in Lincoln und Aberdeen (1968) ausgeführten, sind in der Lastabtragung ähnlich, egal ob ihre Flächen aus Hyparschalen oder Faltflächen gebildet werden.

Herstellung:

Die Hyparschalenkonstruktionen aus faserverstärkten Kunststoffen hatten viele Wegbereiter. Wesentlich in diesem Zusammenhang zu nennen sind Z.S. Makowski von der University in Surrey und einer seiner ehemaligen Studenten, John Zerning. Bemerkenswert ist hier noch eine eigenwillige Technik, die John Zerning zur Herstellung von Hyparflächen anwendete, die **Cocooningtechnik** (Sprühverfahren). Mit dem Wissen, dass eine Hyparfläche durch ein Netz von Geraden dargestellt werden kann, entwickelte Zerning ein Verfahren, das solch ein Netz von Geraden mit einer schnell erhärtenden Masse besprüht. Bei diesem Spinnverfahren wird mit einer speziellen Düse eine schnelltrocknende Vinyl-Latex-Schicht auf ein Netz aufgebracht, beim Trocknen bildet die Latexschicht eine vorgespannte Membran mit minimaler Oberfläche. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr wirtschaftlich auch schwierige und große Formen für Hyparflächen herstellen. Die Maschenweite ist bis zu 50 cm, in Einzelfällen sogar bis zu 75 cm unkompliziert herstellbar *Saechtling (1973), 502*. John Zerning nutzte diese Technik, die in Amerika bereits 1953 angewandt und mit „sprayed-on vinyl“ bezeichnet wurde. Große Plastiken, ein Beach House (Projekt), aber auch Stühle und Lampen ließen sich mit dieser Technik herstellen *New Jobs (1953), 94*.

Spannweiten:



Abb. 119 links

Cocooning-Technik von John Zerning *Saechtling (1973), 502*

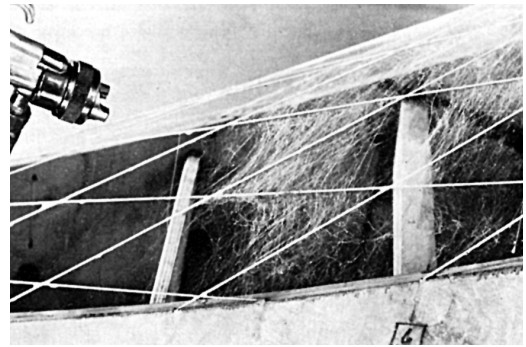


Abb. 120

diese Technik wurde bereits 1953 unter dem Namen „sprayed-on-vinyl“ in den USA angewandt *New Jobs (1953)*

Die gebauten Beispiele spiegeln eindeutig die Leistungsfähigkeit dieser Tragwerksform wieder. In fast allen Fällen werden 10-15 m überspannt, die Tribüne des Stadions Laval mit Polycorrolles-Elementen 1971 durch Yves Chaperot spannt sogar 28 m im Feld und kragt in Gegenrichtung 10,50 m zum Dachrand aus *Du Château (1972), 58*.

Das Beispiel des Stadions Laval zeigt neben der beachtlichen Spannweite noch etwas anderes. Es zeigt die Leistungsfähigkeit von Elementen aus FVK in einer Tragstruktur und wie man sie erreicht – mit dem für das Bauen mit Kunststoffen typischen Additionsprinzip – der Bildung eines großen Tragwerkes aus identisch kleinen Elementen. Hier ist der Entwurfsvorgang aus dem Additionsprinzip entsprungen. Du Château nimmt die von Yves Chaperot entworfenen und bereits industriell angebotenen Hyparschalenelemente mit Namen Polycorrolles und entwirft daraus ein neues Tragwerk, indem er

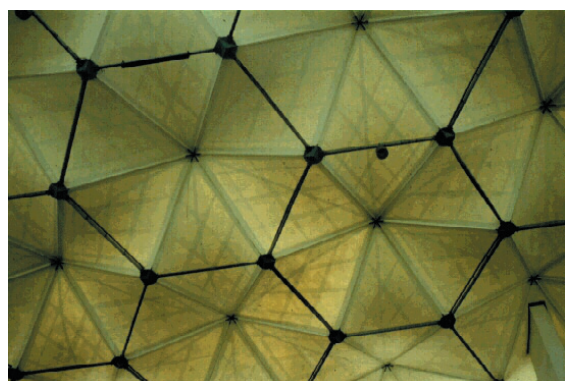
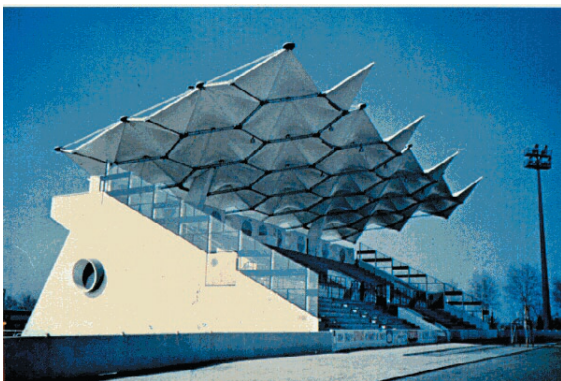


Abb. 121 (links) und 122

Stadion Laval von Stephane Du Château unter Verwendung von vorgefertigten Serienelementen von Yves Chaperot (Polycorrolles)

www.unb.br

die oberen Ecken der Kunststoffelemente mit Stahlrohren verbindet. Er baut aus Vorhandenem eine neue Struktur. Dieses Entwurfsprinzip ist gegensätzlich zu den Entwürfen für Kugelschalen, die aus dem großen Tragwerk der Schale durch Zerschneiden viele Einzelteile erzeugen. Sowohl Du Château als auch Makowski mit seinen Raumgitter-Flächentragwerken legen hier keine unwesentliche Fährte für die Hybriden Tragwerke, die etwa 20 Jahre später durch Jörg Schlaich und seine Mitarbeiter Knut Gabriel und Rosemarie Wagner an der Universität Stuttgart gelehrt und angewandt werden *Wagner/Gabriel (1989/90)*. Schlaich und seine Mitarbeiter erbringen den Beweis der außerordentlichen Leistungsfähigkeit solcher hybrider Tragwerke in der Theorie und in der Praxis. Die Verwendung von FVK in hybriden Tragwerken sollte demnach zukunftsfruchtig sein. Auf diesem Gebiet lassen sich mit geringem Aufwand wirtschaftliche Tragwerke erzielen.

4.3.2.4 Schirme aus gekrümmten Schalenflächen

Ein weiteres wirtschaftliches Additionsprinzip ist die Verwendung von gekrümmten Schalenflächen für Schirm- oder Pilzkonstruktionen. Pilzkonstruktionen aus FVK zählen neben den Schalen zu den am häufigsten angewandten Konstruktionen. Eigentlich müssten diese Konstruktionen ja „Trichter“ heißen, denn in allen Fällen ist der als Pilz bezeichnete Trichter nach oben geöffnet. Zur Unterscheidung ist hier folgendes anzuführen. Um eine Schirmkonstruktion handelt es sich nur dann, wenn die Flächen des Trichters planmäßig unter Zugspannung gesetzt werden. Diese zugbeanspruchten Schirmkonstruktion, dazu zählen die Überdachung der Expo '64 in Lausanne von Heinz Hossdorf mit dem nach oben geöffneten Trichter und die Dachkonstruktion in Genua (1968) sowie der Pavillon für Osaka (1970), beide von Renzo Piano entworfen und mit nach unten geöffnetem Trichter, werden in der Rubrik Schirme zwar aufgelistet, ihr Tragwerk wird jedoch unter den zugbeanspruchten Tragwerken erläutert.

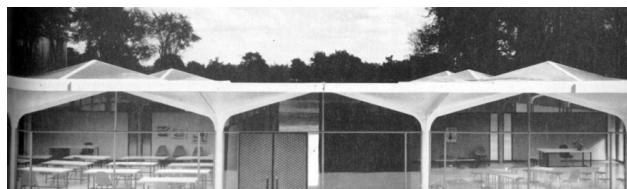
Von einer Pilzkonstruktion sprechen wir, wenn die Flächen des Trichters unter Druckspannungen stehen. Dabei können die Flächen von Hyparflächen gebildet werden, oder von ebenen Flächen. Pilze, die aus ebenen Flächen gebildet werden, sind weniger leistungsfähig als solche mit gekrümmten Flächen. Pilze mit ebenen Flächen sind vom Tragverhalten den Faltwerken zuzuordnen. Sie wurden nur für wenige Aufgaben angewandt, das bekannteste Beispiel dieser Tragwerksgattung ist der Dubai Airport. Die 18 m weit spannenden Pilze kommen mit ebenen Flächen aus, da sie nur einem geringem Lastaufkommen standhalten müssen.

Weit mehr Beispiele lassen sich für Pilze mit gekrümmten Schalenflächen finden. Eines der ersten Häuser aus FVK überhaupt wurde mit Pilzen aus Hyparflächen konstruiert. Hier schließt sich der Kreis zu den Ingenieuren des Monsanto House of the Future, die das erste Wohnhaus mit FVK realisierten. Mit dem gleichen Forscherteam wie für das Monsanto House – Albert G.H. Dietz, Goody, E. Heger, F. Gigliotti, aus dem Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) und der Monsanto Chemical Company wurde eine Volksschule aus Hyparflächen entwickelt. Die Entwicklungsarbeiten begannen 1958, die Montage erfolgte 1959. Das Schulhaus wurde aus Pilz-Modulen zusammengesetzt und war jederzeit erweiter- oder reduzierbar und entsprach damit genau den damals gestellten Anforderungen, da sich der Bedarf der Schulklassen nicht abschätzen ließ (Abb. 123, 124).

Weitere Schirmkonstruktionen sind in der Tabelle zusammengestellt. Hervorzuheben sind die nur 1,5 mm dünnen Schirme für die Amerikanische Ausstellung in Moskau 1959, ebenfalls von A.G.H. Dietz entworfen. Nach der Ausstellung wurden sie auf die Halbinsel Krim verbracht, wo einige Exemplare bis heute erhalten sind *Saechtling (1973)*.



Abb. 123 links und 124
Elementary School in den USA, entwickelt am M.I.T. von den Verfassern
des Monsanto House
Gigliotti (10/1961), 384



Spannweiten:

Die Einzelschirme haben in den meisten Fällen ein Ausmaß von bis zu 10×10 m. Die fast doppelt so großen Spannweiten einiger Beispiele ergeben sich aus Tatsache, dass dort die Elemente vorgespannt sind.

4.3.2.5 Freiformen

Wie bereits im Kapitel Personen berichtet, gab es für den Schalenbauer Heinz Isler drei Möglichkeiten, zu einer günstigen Schalenform zu kommen:

1. Der frei geformte Hügel, dessen Schalungsform zum Beispiel aus modellierter Erde besteht.
2. Die unter Druck stehende Membrane, die aufgeblasen die richtige Form bildet
3. Das durchhängende Tuch, das versteift umgedreht wird. Die Durchbiegung des Stoffes bestimmt die Form, gerade so wie ein hängendes Seil die Seillinie bestimmt

Der Tragwerkstyp der Schalenfreiformen aus FVK wird fast ausschließlich durch Bauten belegt, die von Heinz Isler entwickelt und ausgeführt worden sind. Nur Experimentierer und Tüftler wie Heinz Isler oder Frei Otto sind zu solchen Tragwerken und deren schadensfreien und wirtschaftlichen Realisierung fähig.

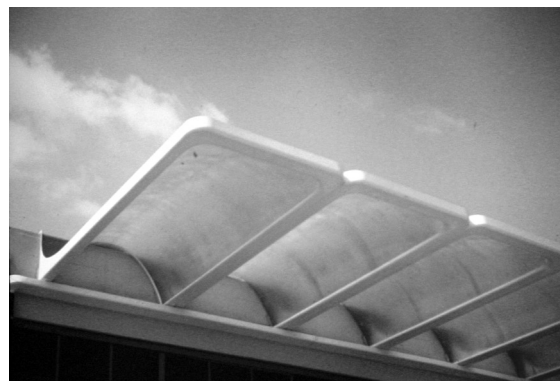


Abb. 125 links und 126
Buckelschalen von Heinz Isler aus GFK
Fomeke (2003)

4.3.2.6 Biegebeanspruchte Schalen

Einige der bekanntesten Beispiele von Tragwerken aus FVK sind in der Tragwerksgattung der biegebeanspruchten Schalen zu finden. Das Monsanto House (1957), das Bulle Six Coque (1967), das Rondo (1969) oder das Venturo CF 45 (1969) entstanden aus der Möglichkeit, den Werkstoff in jeder beliebigen Form herzustellen. Alle in dieser Tragwerksgattung verzeichneten Beispiele sind Tragwerke für Häuser, unabhängig von ihrer Grundrissfläche. Da sich für Wohnhäuser membrankraftbeanspruchte Schalenformen schlecht eignen, bekommen die biegebeanspruchten Schalen ihre Berechtigung. Sie verbinden freies, ungezwungenes Design mit sinnvollen Raumvolumina. Herstellbarkeit, Vorfertigung und einfache Fügung, Mobilität und Transportabilität geben die Randbedingungen zu den gewählten Schalenformen vor. Im Gegensatz zu anderen Schalenformen besitzen sie kein günstiges Lastabtragungsverhalten.

Analog zu den Plattentragwerken sind die biegebeanspruchten Schalen aus verstärkten Kunststoffen Flächentragwerke, die durch Kräfte senkrecht zu ihrer Ebene eine Verformung der Mittelfläche erfahren. Über ihre Tragfähigkeit entscheidet die Dicke, so dass sie - ebenfalls wie die Platten - ausnahmslos Stützkernkonstruktionen sind. Stützkernkonstruktionen wurden bereits unter dem Kap. 4.3.1.1 erläutert.

Spannweiten:

Die biegebeanspruchten Schalen sind im Tragverhalten den membrankraftbeanspruchten Schalenformen deutlich unterlegen. Mit biegebeanspruchten Schalenformen werden etwa 15 m erreicht, die ausgeführten Beispiele zeigen sogar eine Begrenzung der Spannweite auf etwa 7 m - die gleiche Größenordnung wie auch die Plattentragwerke - während mit den membrankraftbeanspruchten Schalen problemlos 20 bis 25 m erreicht werden.

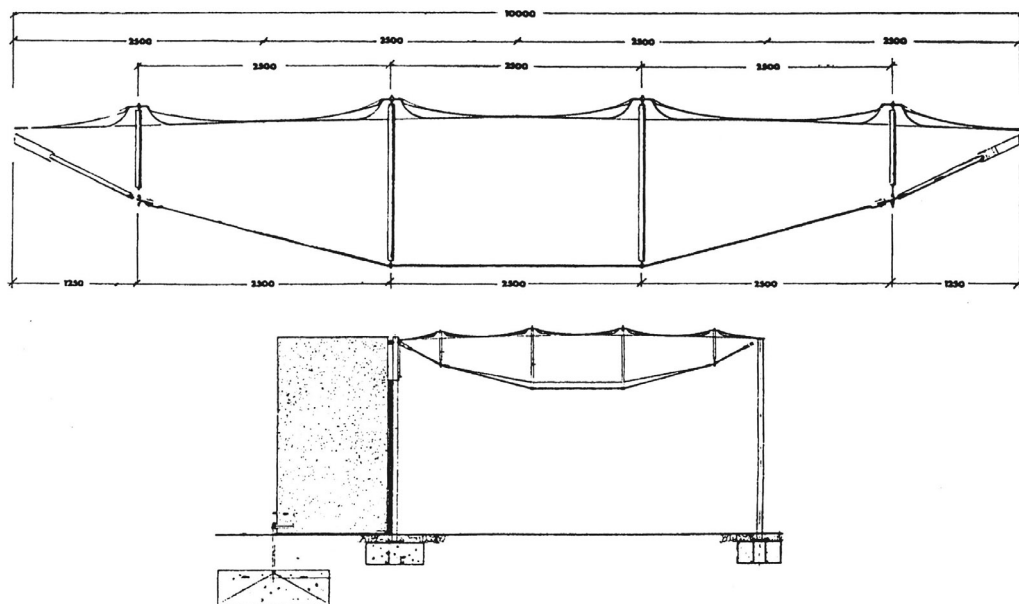
4.3.3 Zugbeanspruchte Tragwerke

Für Tragwerke, die aus Zugflächen bestehen, sind faserverstärkte Kunststoffe ideal geeignet. Sie können mit minimalstem Aufwand an Material hergestellt werden. Infolge der Zugbeanspruchung kann kein Beulen auftreten, so dass auch größere Spannweiten realisierbar sind. Dies zeigen eindeutig die ausgeführten Projekte, deren Spannweite als einlagige Konstruktionen zwischen 10 und 25 m liegt, wobei die Dicke der Zugmembran zwischen 2,5 und 5 mm beträgt.

Nur wenige Konstrukteure erkannten und beherrschten das Potential des FVK in einer zugbeanspruchten Konstruktion. Heinz Hossdorf, Renzo Piano und später noch Günther Ackermann wandten dieses Prinzip an. Natürlich mussten die zugbeanspruchten Flächen aufgelagert, bzw. an ihrem Rand durch eine andere Konstruktion eingefasst werden. Das Auflagerproblem lösten nur die Erfinder unter den Ingenieuren. Zur Problematik der Verbindung der Schirme für die Expo '64 in Lausanne wurde bereits unter 3.3.2 berichtet.

Ein anderer Konstrukteur, der mit Erfolg zugbeanspruchte Tragwerke aus GFK entwickelte, ist Renzo Piano.

Zwei Ideen der Anwendung von FVK als zugbeanspruchtes Element in einer Gesamtkonstruktion zeugen von Pianos großer Ingenieurkunst. Das erste Beispiel ist die gespannte Struktur aus Stahl und glasfaserverstärktem Polyester in Genua (1966, Abb. 127-130). Im Prinzip handelt es sich um eine unterspannte Platte. Die Platten sind vorgespannte (und damit druckfeste) Elemente aus FVK, die mit einer stählernen Unterspannung versehen sind und somit einen Raum von 10 m frei überspannen. Die Vorspannung der Elemente aus FVK geschieht durch die Funktionsweise der Tragstruktur selbst. Unter Eigengewicht hängt die Konstruktion durch und bringt eine Zugspannung in das Seil, welches wiederum die Luftstützen nach oben drückt, die die FVK-Elemente dadurch vorspannen (Abb. 127). Das andere Beispiel für die Anwendung des Vorspannprinzips ist der Pavillon der Italienischen Industrie auf der Expo in Osaka (1969-70). Es handelt sich hier um eine gespannte (man sagt auch über und unterspannte) Stahlstruktur, an welcher die FVK-Elemente an den Zugbändern aufgehängt sind. Sie werden auf Zug beansprucht (Abb. 31).



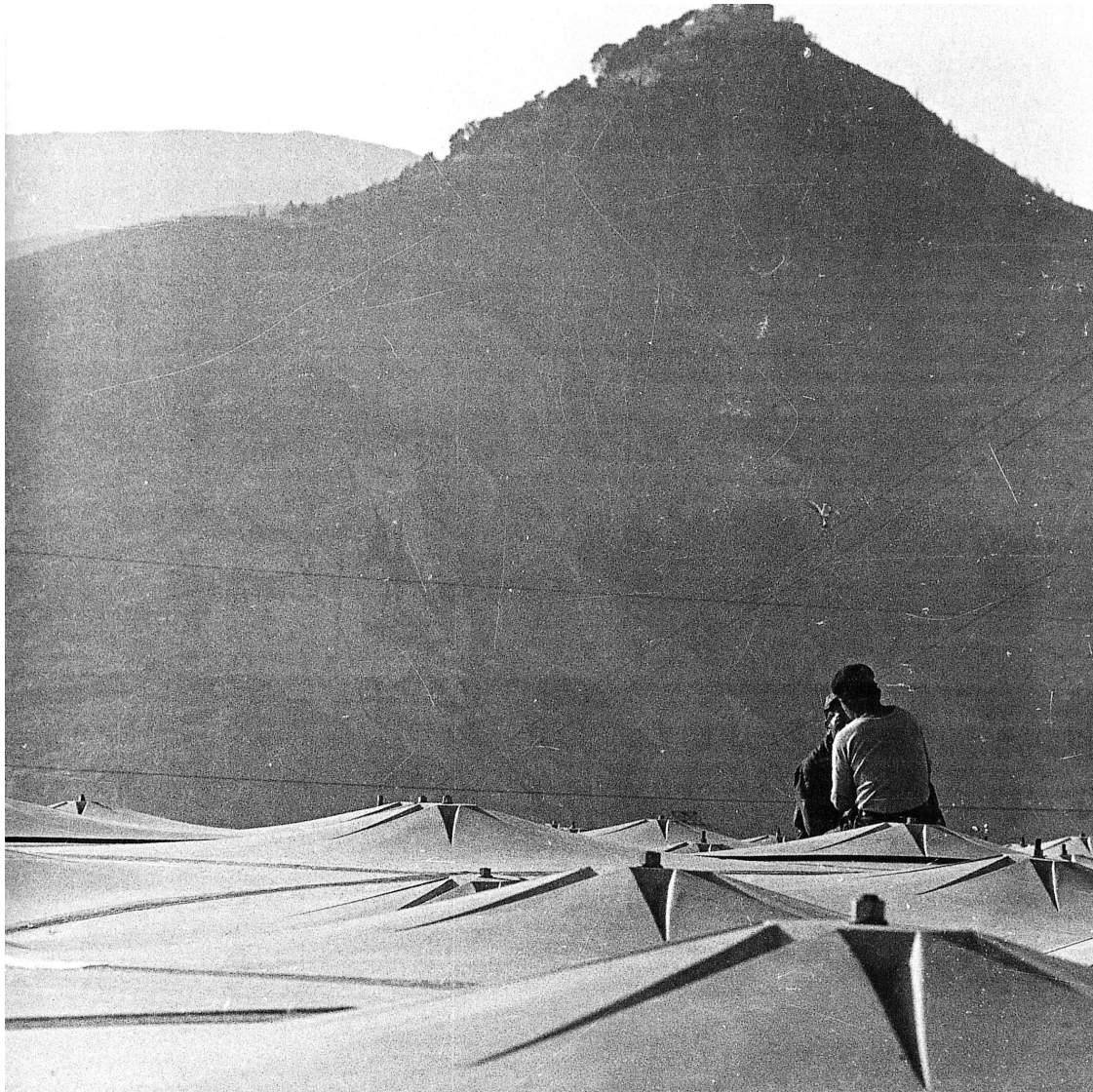


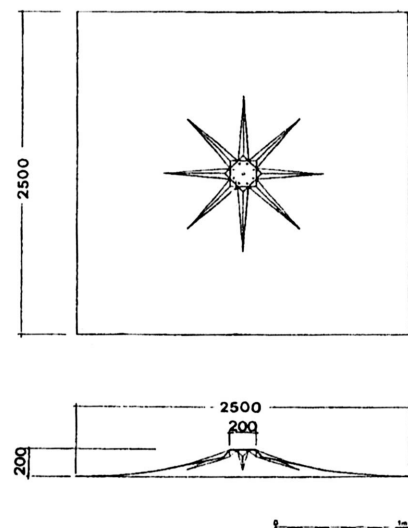
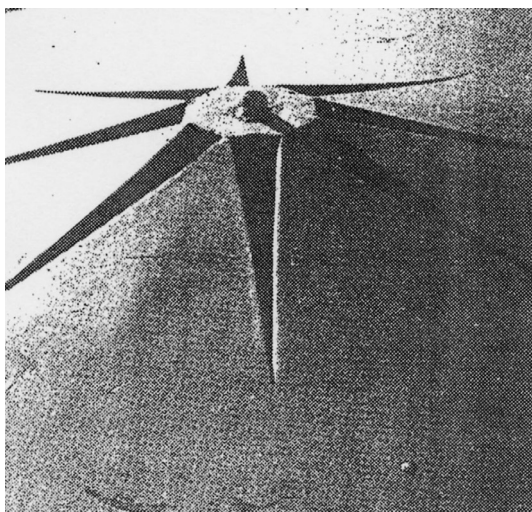
Abb.127 (gegenüberliegende Seite)

Abb. 128 oben, 129 unten links und 130

Dachkonstruktion in Genua 1966 aus vorgespannten GFK-Elementen von Renzo Piano

Compagno (1991), 60 ff.

Piano (1997), 25



Spannweiten:

Die meist in vorgespannten Schirmkonstruktionen verwendeten Zugflächen überdecken pro Schirm eine Fläche von ca. 18×18 m. Infolge der Beanspruchung Zug ist es denkbar, diese Flächen unendlich zu verlängern. Grenzen dieser Verlängerbarkeit sind hier nicht durch die Statik, sondern durch die Dynamik gesetzt: Die Schwingungsproblematik dünner beanspruchter Flächen berücksichtigte auch Heinz Hossdorf bei der Ausführung der Schirmflächen.

4.4 Auswertung der Tragwerke aus FVK

Aus der Betrachtung der ausgeführten Tragwerke ergibt sich folgendes Bild:

Mit der Anwendung von FVK werden keine neuen Tragwerke entwickelt. Der Werkstoff findet, aufgrund seiner dem Beton ähnlichen Eigenart, in einer Form zu erhärten, vornehmlich Verwendung für flächige Tragwerke.

Die verwendeten Flächentragwerkstypen sind alle bereits aus dem Betonbau bekannt. Die Art und Weise der Umsetzung eines idealisierten Tragwerks in ein Gebautes, unterscheidet sich jedoch vielfach vom Betonbau.

Der FVK-Bau ist geprägt durch Teilung der Tragwerksstruktur in Einzelteile. Dies hat folgende Gründe: Das Kostspieligste an der Herstellung eines Flächentragwerkes aus FVK ist die Form. Ergibt sich die Möglichkeit, das Tragwerk aus identischen Teilen herzustellen, so kann der Herstellungsaufwand verringert werden. Das gleiche gilt für die Transportkosten, kleine Teile bedeuten geringen Aufwand. Umgedreht sind die Aufwendungen der Fügungen zu sehen, Kleinteiligkeit bedeutet mehr Aufwand für die Fügungen, gleichzeitig vermindert sich das Tragvermögen durch Fügungen, die als singuläre Störungen gelten können.

In Auswertung der Tabelle „Ordnung der Tragwerke“ kann gesagt werden, das flächige Bauteile zwar durchaus mehr als 3 m spannen, die Elementgröße aber bleibt aus Transportgründen auf 3 bis 5 m begrenzt. Die Kosten der Schalungsform sind hierbei das ausschlaggebende Kriterium.

Fast alle ausgeführten Projekte entstanden in Vorfertigung, lediglich die Prototypen wurden mitunter vor Ort geschalt. Diese Prototypen weisen im Gegensatz zu den anschließend folgenden Serientypen eine kleinere oder gar keine Tragwerksteilung auf. Was durch die Tragwerksteilung befördert wird, ist das mobile Bauen.



Abb.131

Faltwerke aus FVK lassen sich optimal teilen:
Überdachung des Pausenhofes einer Schule in Geisslingen,
Faltwerk von Heinz Isler
Isler (1975)

4.5 Teilung und Elementierung der Tragwerke aus FVK

Warum aber legte man überhaupt so großen Wert auf die Vorfertigung? Die Pionierbauten mit FVK datieren wir in die Zeit nach dem zweiten Weltkrieg bis Ende der 1960er Jahre. Die Industrialisierung des Bauens hatte bereits einige Jahre hinter sich, wie Matthias Ludwig in seinem Buch „Mobile Architektur“ nachweist. Bekannte Architekten wie Gropius und Le Corbusier sahen bereits Anfang des 20. Jahrhunderts im industriellen Bauen eine große Zukunft *Ludwig (1998), 11*. Nach dem ersten Weltkrieg wurden, ausgelöst durch Wohnungsnot und Arbeitslosigkeit eine Reihe architektonischer Lösungsvorschläge erarbeitet, die industriell gefertigte Wohnhäuser vorsahen. Nach dem zweiten Weltkrieg war die Situation keine andere, aber vielfach zugespitzter: In kürzester Zeit musste der anstehende Bedarf an Wohnraum gedeckt werden. Industrielle Vorfertigung schien den meisten Bauleuten ein geeignetes Mittel zur Erfüllung der anstehenden Aufgaben. Ein anderer Grund ist in der in Architektenkreisen vorherrschenden Ideologie der 1960er Jahre zu sehen. Attraktiv waren Häuser, die industrielle Methoden der Herstellung nutzten und auch solche, die durch ihre Elementierung mobil waren. Damit sollte sowohl der Unterversorgung der Bevölkerung mit Wohnraum als auch ihrer wachsenden Mobilität Rechnung getragen werden.

Vorfertigung und Elementierung als Entwurfsgrundsätze lassen sich aber auch ohne Ideologie der Architekten und ohne die Industrie als Bauherren konstatieren. Niemand wäre auf die Idee gekommen, eine komplizierte Form aus nur einem Element herzustellen. Das Machbarkeitskriterium ist also allein hinreichend für Elementierung und Vorfertigung

Was für Auswirkungen auf das Tragverhalten hat nun die Herstellung des Tragwerkes aus (identischen) Einzelteilen?

Dem Entwerfer des Tragwerkes aus FVK kam erst einmal die Aufgabe zu, eine ideale Elementgröße herauszufinden Polónyi empfiehlt dazu folgendes.

- „Um wenig Anschlüsse und eine geringe Anzahl von Elementen zu haben, sind möglichst große Elemente zu entwerfen.
- Um einfache Anschlüsse zu haben, sollen diese möglichst keine oder nur geringe Beanspruchung bekommen. Die Einhaltung dieser Bedingung ermöglicht es in der Regel, die Montage ohne Hilfsgerüst und Hilfstützungen durchzuführen.
- Und für Überdachungen die Empfehlung: Stoßstellen wegen der Dichtung möglichst obenliegend anzuordnen.“ *Polónyi (1973), 4*

Ein weiteres Kriterium bei der Findung der optimalen Elementgröße sind die vorherrschenden Spannungen. Hierzu gelten folgende Kriterien *Polónyi (1973), 4*.

Faltwerke:

Faltwerke lassen sich optimal elementieren. An ihren Kanten werden die inneren Kräfte umgelenkt. Dort kann problemlos ein Stoß angeordnet werden, die Fügung hat auf die inneren Kräfte kaum negativen Einfluss. Polónyi schlägt allerdings die Stöße in der Fläche vor, um durch die Abkantung die Fläche zu stabilisieren (dies scheint dann sinnvoll, wenn immer die druckbeanspruchten Flächen gestoßen werden, die zugbeanspruchten nicht).

Beispiele für eine elementierte Faltung sind die Pausenhof-Überdachung der Realschule in Geislingen (1967) von Heinz Isler, die räumlichen Strukturen in Genua (1965) von Renzo Piano (Abb. 129) und die Battersea Faltwerke (1968) von B.S. Benjamin unter Leitung von Z.S. Makowski (TOdT 4.3.1.3-1968/05).

Einsinnig gekrümmte Schalen (Zylinderschalen):

Einsinnig gekrümmte Schalen werden in Ringrichtung geteilt. Die bis zu 60 m messenden Kamine entstehen aus Einzelzylindern, deren Länge etwa das Doppelte des Durchmessers misst. Ihre Teilung ist nicht nur herstellungsbedingt, sondern auch nötig aufgrund der Zwangsspannungen aus den Lastfällen Wärme und Abkühlung (Abb. 132). Auch Heinz Isler äußerte sich zur Teilung einer solchen Zylinderschale am Beispiel des Dutler-Röhrenhauses und erklärt deren Notwendigkeit. „An diesem Kunststoffteil ist noch erwähnenswert, daß die äußere Sandwichhaut ein durchgehendes Rohr bildet. Die innere Haut hingegen ist an drei Stellen zerschnitten, so daß dort vier Teilrohre von 4 m Länge entstanden. Ohne diese Maßnahme wäre das Sandwich durch die ungleichen Wärmeverformungen von außen zu innen zerrissen worden.“

Isler (1975), 5

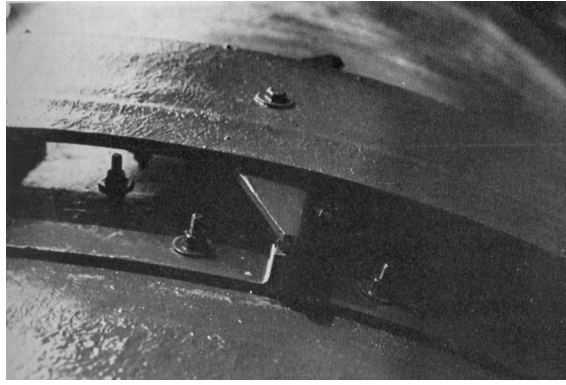
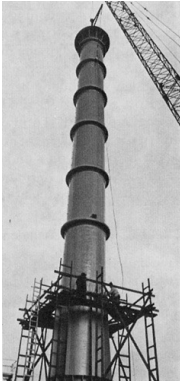


Abb. 132 (links) und 133
DienTeilung von Schornsteinen aus FVK erfolgt in Längsrichtung
Saechtling (1973), 205

Synklastische Schalen (alle TÖdT 4.3.2.2):

1. Flache Kuppeln

Kugelkalotten, deren unterer Rand oberhalb der Bruchfuge liegt, sind nur durch Druck beansprucht. Solche flachen Kuppeln teilt man daher radial in gleiche Elemente (Abb. 134).

(Futuro, Rondo, Sheika Badrich Moschee)

2. Hohe Kuppeln

Als hohe Kuppeln bezeichnet man solche, die mindestens halbe Kuppeln sind. Man teilt sie entweder wie flache Kugelkalotten (Egon Prütsch Kunststoffhaus, Polar Iglu, Pavillon für deutsche Industrieausstellung Brasilien, Pavillon Reichhold-Albert-Chemie). Weitverbreiteter ist die geodätische Teilung nach Buckminster Fuller (Beispiele: Mobay Iglu, Monohex, Konstruktionssystem für die XIV. Triennale in Mailand von Renzo Piano sowie alle Stabwerkskuppeln).

Ergeben sich bei der Elementierung spitze Ecken, so lassen sich diese spitzen Teile (die gut transportabel sind) ohne Probleme zusammenfügen, wenn sie einlagig sind (Pavillon Industrieausstellung in Brasilien 1971 Polónyi). Bei Sandwichelementen verursacht die Fügung Probleme, wie beim Pavillon der Reichhold-Albert-Chemie zu konstatieren war.

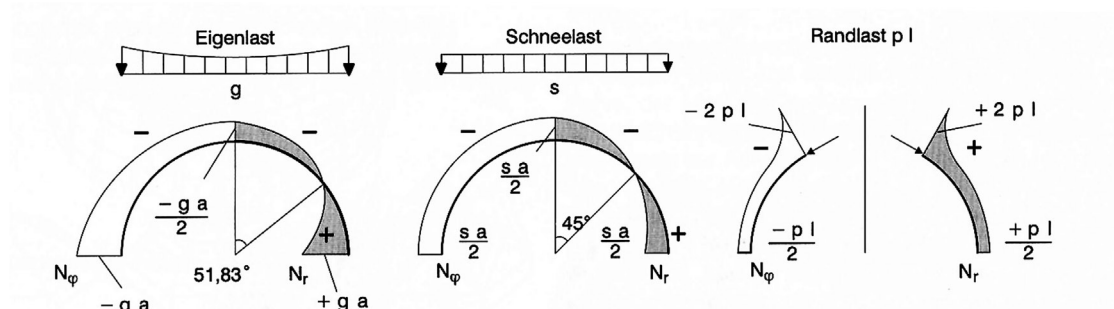
Antiklastische Schalen (Hyparschalen) (alle TÖdT 4.3.2.3):

Aus kleinen antiklastischen Schalenflächen lassen sich durch Addition leistungsfähige Tragwerke herstellen. Hier sind die Hyparschalenelemente für sich genommen ungeteilt und werden in ein Gesamttragwerk integriert.

(Schwimmbad Lincoln und Aberdeen, Dach in Texas, Diamant, Einkaufskomplex Dundee, Kletterplastik, Markt Lezoux).

Im Grundriss betrachtet beschreiben die Hyparschalen Rechtecke. „Bei Überdachung von Rechteckgrundrissen ist es zweckmäßig, durch eine Primärkonstruktion eine quadratische Aufteilung vorzunehmen.“ *Polónyi (1973), 5* Es lassen sich aber auch Beispiele anführen, wo eine große Hyparschale in Einzelteile zerschnitten wird. Die Teilung erfolgt in Dreiecke.

Abb.134
flache Kugelkalotten teilt man aufgrund ihres Spannungsverlaufes meist radial in gleiche Elemente
Schlaich/Heinle (1996)



Zusammenfassung:

Die Teilung der Tragwerke aus FVK ist sowohl herstellungstechnisch bedingt als auch kostenrelevant. Aus der Idee der zusammengesetzten Tragwerke entstehen zwei Lösungsansätze. Erstens werden aus dem Betonbau bekannte Flächentragwerke in Einzelteile zerschnitten und anschließend wieder zusammengefügt. Aufgrund der singulären Störungen ist das Tragverhalten gegenüber dem ungeteilten Tragwerk verändert. Auf diese Störung wird mit konstruktiven Lösungen, in den meisten Fällen mit einer Randaufkantung, geantwortet. Sie werden in den seltensten Fällen rechnerisch nachgewiesen. Neue Fügetechniken entwickeln sich noch nicht, es werden die Techniken der Skelettbauweisen Holz und Stahl verwendet. Vom Betonbau kann keine Fügetechnik abgeschaut werden.

Zweitens wird aus kleinen ungeteilten Elementen eine Großstruktur gebildet, meist unter Hinzufügung von weiteren Elementen aus anderen Materialien. Es werden Tragwerke mit neuer Tragqualität gebildet, indem die Elemente aus FVK gemeinsam mit den anderen (Stahl-)Elementen tragen und ihre weniger positiven Eigenschaften dadurch abgemildert werden. Dieses Bildungsprinzip verfolgen später auch die Autoren Schlaich, Wagner und Gabriel und definieren es als „hybrides Tragwerk“.

5. Die Geschichte der Bemessung

5.1 Einleitung

Dieses Kapitel geht der Frage nach, wie die Pioniere des Kunststoffbaus ihre Tragwerke bemaßen. Welche statischen Kenntnisse besaßen sie, wie wendeten sie diese an, wie gelangten sie letztlich zu gültigen Abmessungen für ihre Tragwerke.

Eines ist sofort offensichtlich, bemessen heißt nicht allein berechnen. Gültige Bemessungsregeln im Sinne von Berechnungsalgorithmen liegen zu Beginn der Pionierzeit um 1950 noch keine vor. Sie werden im Zuge der Erstellung der Tragwerke erarbeitet und stehen mit Erscheinen der beiden hauptsächlichen Regelwerke von Hintersdorf und Saechtling zur Verfügung *Hintersdorf (1972)*, *Saechtling (1973)*. Wie aber halfen sich die Ingenieure, die bis dahin alle Bauten errichteten? Sicher ist, dass nur durch die Beherrschung der Theorie allein kein einziger Bau aus FVK entstanden wäre. Die praktische Erprobung des Materials bzw. der Bauteile in Modellversuchen war das einzige Mittel, um die Standsicherheit der Tragwerke gewährleisten zu können.

Die theoretischen Kenntnisse der Festkörperstatik waren in der Mitte des 20. Jahrhunderts den meisten Bauingenieuren zu eigen bzw. konnten rezipiert werden. Mit etwas Mühe (infolge der noch nicht vorhandenen Rechentechnik) konnten die Beanspruchungen, die ein Tragwerk aufnehmen musste, aus den Belastungen ermittelt werden. Bei den Belastungen zeigen sich aber bereits große Unterschiede zu anderen Materialien. Während es bei Holz, Beton und Stahl in den meisten Fällen genügt, die Hauptlasten Wind, Schnee und Verkehrslast zu berücksichtigen, sind aufgrund der Materialbeschaffenheit für FVK auch die Temperaturdifferenz und Kriechen zu berücksichtigen. Das Verformungsverhalten unter Temperatur und das Kriechverhalten wurde über Zusatzlasten appliziert, sie sind in den meisten Fällen maßgebliche Lastfälle. Auch die Unterscheidung in Lasten, die nur kurzzeitig auftreten und solche, die dauernd oder zumindest über einen längeren Zeitraum vorhanden sind, ist bei der Bemessung von Tragwerken aus FVK dringlich zu empfehlen. Auch dies wird durch die besonderen Materialeigenschaften bestimmt.

Auf der anderen Seite machen es diese besonderen Materialeigenschaften nun äußerst schwierig, die Widerstände zu bestimmen, die das Material den Beanspruchungen entgegensetzen kann. Der Verbundwerkstoff kann auf unterschiedlichste Weise zusammengesetzt werden. Über seine Lebensdauer betrachtet, weist er entsprechend ein breites Spektrum unterschiedlichster Widerstände auf. FVK ist ein Werkstoff mit veränderlichen Eigenschaften, und zwar in negativer Richtung veränderlich. Dies gilt insbesondere für das Festigkeits- und Verformungsverhalten. Medieneinflüsse wie UV-Strahlung, Temperatur sowie das Wirken einer Dauerbelastung setzen die Kurzzeitfestigkeit des FVK bis zu 10 bis 12,5 % der Anfangsfestigkeit herab *Domke (5/1975), 196*. Die richtige Einschätzung der nach Jahren noch zur Verfügung stehenden Widerstände des Materials war das größte Problem der bemessenden Ingenieure. Faustformeln oder Richtwerte standen nicht zur Verfügung. Das Entstehen von Bemessungsregeln für Tragwerke aus FVK Kunststoffen war ein iterativer Prozess, der aufs engste mit der praktischen Versuchstätigkeit der Pioniere verknüpft ist und durch diese vorangebracht wurde. Die nachfolgende Übersicht zeigt das Neuland bei der Bemessung dieser Tragwerke auf.

Lasten	Beanspruchungen	Widerstände
<i>bekannt:</i> Normlasten nach DIN <i>neu:</i> Temperaturlast, Kriechlasten <i>neu:</i> Einordnung der DIN-Lasten in Kurzzeitlasten/ Dauerlasten, Abschätzen der Lasteinwirkungsdauer und Intensität	Ermittlung <i>bekannt</i> aus Festkörperstatik (M, N, Q)	<i>Problem:</i> Verschiedenartigkeit der Zusammensetzung der Faser-Harz-Matrix <i>neu:</i> Langzeitverhalten unbekannt, erforderliche Abschätzung der Auswirkungen von <ul style="list-style-type: none"> - Medieneinfluss (UV) - Temperatureinfluss - Dauerlast - Herstellungsungenauigkeiten

5.2 Materialeigenschaften

Die ansonsten an den Regeln der klassischen Festigkeitslehre ausgerichtete statische Berechnung von Tragwerken aus FVK war in einem Punkt stets problematisch: in der Erfassung der materialseitigen Widerstände. Die weniger vorteilhaften Materialeigenschaften werden im Folgenden benannt.

Niedriger Elastizitätsmodul

FVK besitzen einen niedrigen E-Modul, ungefähr die Hälfte desjenigen einer mittleren Holzgüte. Infolge dessen tritt bei allen Konstruktionsformen das Problem der Stabilität in den Vordergrund. Entsprechend eignen sich solche Tragwerke gut für FVK, die entweder kein Stabilitätsproblem aufweisen, also alle zugbeanspruchten Tragwerke, als auch solche, die durch ihre Formgebung dem Stabilitätsproblem entgegenwirken, also Schalen, Falten, Sandwichkonstruktionen.

Teilweise fehlende Fließfähigkeit, geringe Bruchdehnung

Faserverstärkter und besonders glasfaserverstärkter Kunststoff zeigt im Vergleich zum Stahl ein rein elastisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm. „Der große plastische Bereich, den wir vom Stahl her gewohnt sind und der uns bei ungenauer Berechnung seine Tragreserve zur Verfügung stellt, fehlt vollkommen.“ *Hossdorf (1963), 10* Kurzzeitig auftretende Spannungsspitzen können nicht durch Fließen abgebaut werden. Entsprechend bestehen erhöhte Anforderungen an die Konstruktion des Bauteiles, speziell im Bereich der Fügungen.

Hoher Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von FVK ist gegenüber klassischen Baustoffen um das 2 bis 5-fache höher. Dies bedingt eine sorgfältige Konstruktion hinsichtlich der Zwängungsfreiheit bzw. eine Berücksichtigung der Beanspruchung aus Zwängung infolge Temperatur.

Zeitabhängige Veränderungen, Kriechen

Das größte Problem der FVK ist jedoch, dass sich die dargestellten Eigenschaften mit der Zeit verändern. Das Material kriecht. Unter Dauerlast und unter Temperaturbeanspruchung nimmt sowohl die Festigkeit des Materials als auch der E-Modul im ungleichen Verhältnis ab. Das richtige Abschätzen des zeitabhängigen Verhaltens war und ist immer noch der Schlüssel zu einer effektiven Tragkonstruktion aus FVK. Bei der Verwendung des Werkstoffes für Bauten muss man mindestens eine Lebensdauer von 20 Jahren ansetzen. Eine Einschätzung über einen so großen Zeitraum war aber den Pionieren nur sehr schwer möglich. Zu Beginn der 1960er Jahre war noch nicht einmal gesichert, wie die Kriechkurve verläuft. Nur über Versuche konnte einigermaßen Klarheit geschaffen werden. *Hossdorf (1963), 18* bemerkt über seine Versuche zur Expo '64: „Es wurde daher zuerst ein Relaxationsversuch in der CIBA ausgeführt, der, obwohl er nur während 120 Stunden lief, doch die Vermutung bestätigte, daß das Kriechen nach einer logarithmischen Kurve verläuft.“

- 1949: Albert G.H. Dietz: *Engineering Laminates*. Wiley und Sons: New York, 1949, ein Buch über Eigenschaften von verstärkten Kunststoffen
- 1954: Sonneborn, Ralph H. (Hrsg.): *Fiberglass Reinforced Plastics*. New York: Reinhold Publishing, 1954 enthält einen Beitrag von Albert G.H. Dietz im Part II. Man konnte danach noch nicht bemessen. Es finden sich zwar eine Reihe Angaben über Materialeigenschaften diverser faserverstärkter Kunststoffe, so Zug-, Druck-, Biegefestigkeit, Schlagzähigkeit, E-Modul *ebenda*, 114 ff. Alle Werkstoffe haben jedoch einen sehr hohen Faseranteil (mind. 55% und max. 75%), sind also im Pressverfahren hergestellte FVK, die an sich für Tragwerke keine Verwendung finden. Zudem wird das im Bauwesen eine wesentliche Rolle spielende Langzeitverhalten der FVK nicht berücksichtigt. Es werden einige Tragwerke aus Laminaten bemessen, darunter Platten und Rippenplatten, Biegebalken, Zylinderschalen. Hauptaugenmerk liegt auf der Ermittlung eines Ersatzmaterials des aus mehreren Lagen Fasern und Harz mit unterschiedlichem E-Modul zusammengesetzten Verbundwerkstoffes
- 1954 beginnt Dietz die Arbeit am Monsanto House of the Future, Es werden grundlegende Materialuntersuchungen nötig und auch gemacht. Die zugehörige Veröffentlichung erscheint

- 1957: Dietz, A.G.H .u.a.: *Final Report – Engineering Analysis and Structural Design of the Monsanto House of the Future*. MIT Engineering Department and Monsanto Chemical Company, Plastics Division : 1957
- 1956: Beyer, W.: Glasfaserkunststoffe für die Bautechnik: Kennwerte für GFK. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1956), S. 591
- Parallel zu den amerikanischen Materialuntersuchungen liest man in Deutschland hier die Kennwerte für GFK ab. Berücksichtigt werden für Glasfasermatte / Parallelmatte / Parallelfaser: Kurzzeit-Festigkeiten σ_z , σ_D , σ_B in Abhängigkeit vom Fasergehalt; Festigkeiten unter Dauerbelastung, unter Temperaturbeanspruchung; E- Modul (Kurzzeit).

Das war das magere „Studien-Material“, das die ersten Pioniere des Kunststoffbaus für ihren neuen Werkstoff zur Verfügung hatten. In den genannten Veröffentlichungen waren neben den genauen Berechnungen von Dietz in *Sonneborn (1954)* zur Laminattheorie - ein unzumutbar aufwendiges Verfahren ohne Rechnerunterstützung - keine übersichtlichen Berechnungsmethoden enthalten. Wie bemaßen also die Pioniere?

5.3. Die Bemessung

Lesen wir noch einmal in der „Geschichte der Baustatik“ bei *Kurrer (2002)*, 32 nach, was während der „Innovationsphase (1950 – 1975)“ an baustatischen Kenntnissen vorlag. Bekannt sind die Theorie der Flächentragwerke, hervorgebracht durch die Entwicklungen des Stahlbetonbaus. Bekannt sind Deformationsverfahren und die Erfassung nichtlinearer Phänomene, hervorgebracht durch immer schlankere Konstruktionen. Die Kenntnisse vom Zusammenhang der Kraft- und Verschiebungsgrößen sind soweit etabliert, dass von einer „dualen Struktur der Baustatik“ gesprochen werden kann: Es werden die Kräfte und die Verschiebungen betrachtet. Kann die Größe der Verschiebungen der Knotenpunkte ermittelt werden (Formänderungsaufgabe), erhält man daraus auch die Größen der Widerstände des Materials (Schnittkräfte; Gleichgewichtsaufgabe). „Beide Aufgaben sind so miteinander verknüpft, daß, wenn die eine vollständig gelöst ist, die andere als gelöst angesehen werden kann.“ *Grüning (1925)*, 7 Zwischen 1930 und 1950 emanzipiert sich das Deformationsverfahren in der Weise, dass ihm historisch die Vorbereitung und Herausbildung der modernen Strukturmechanik zugewiesen werden kann *Kurrer (2002)*, 420. Damit war auch den Pionieren des Kunststoffbaus die Möglichkeit gegeben, die stabilitätsgefährdeten Flächentragwerke aus FVK über die Verschiebungen abzuleiten. Den Ansatz, Tragwerke aus FVK nicht innerhalb einer kritischen Last, sondern innerhalb einer kritischen Dehngrenze nachzuweisen, stellen mehrere Autoren als grundlegend hin *Menges (1967)*, *Domke (1975)*, *Ackermann (1972)*. Die von Ihnen entwickelten Lösungsansätze widerspiegeln das Verhalten der Tragwerke aus FVK realistischer, als andere Verfahren und tragen wesentlich zur effizienten Verwendung von FVK für Tragwerke des Bauwesens bei. Die Pioniere, die ihre Tragwerke zu einer früheren Zeit bemessen mussten, arbeiteten meist mit dualen Verfahren, die Festigkeit und Verformung betrachten.

5.3.1 Bemessungskonzepte

Es lassen sich drei theoretische Bemessungskonzepte unterscheiden, die in der Reihenfolge ihrer Aufzählung und in Abhängigkeit von regionalen Vorschriften verwendet wurden:

1. Bemessen nach zulässigen Spannungen
2. Bemessen nach Grenzzuständen
3. Bemessen nach zulässigen Dehnungen

Bemessen nach zulässigen Spannungen:

Die Bemessung vergleicht die vorhandene Spannungen mit einer zulässigen. Den werkstoffspezifischen Besonderheiten versuchte man dadurch Rechnung zu tragen, dass die zulässigen Beanspruchungen, bei den klassischen Materialien als Teil der Bruchspannung festgelegt, durch eine Summe von Abminderungsfaktoren verringert werden.

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{v \times A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4}$$

In diesem Nachweis bedeuten

- v einen allgemeinen Sicherheitsfaktor, der üblicherweise mit 2,0 belegt wird und
- A_1 Abminderung mit der Zeit infolge Dauerbeanspruchung
- A_2 Abminderung mit der Zeit infolge höherer Temperaturen
- A_3 Abminderung infolge Alterung durch Medieneinflüsse wie UV-Strahlung
- A_4 Abminderung für Inhomogenitäten, bedingt durch das Fertigungsverfahren

Dieses Verfahren wurde prinzipiell von allen Pionieren der frühen Phase zwischen 1955 und 1970 angewandt. Es erfuhr in diesen Jahren folgende Vertiefung:

1. Die Einflüsse von Alterung und Fertigungsungenauigkeiten wurden anfangs nur von wenigen berücksichtigt oder besser gesagt, geschätzt. Da die Folgen von Alterung durch Bewitterung durch konstruktive Maßnahmen wie eine Gelcoatbeschichtung gut gemildert werden konnten, hatten die Konstrukteure dies selbst in der Hand und geringfügige Abminderungswerte von ca. 1,2 waren völlig ausreichend.

2. Die Einflüsse der Dauerlast schätzte man über Kriechversuche ab. Diese waren meist kurz, die logarithmische Kriechkurve war jedoch deutlich zu erkennen und ließ Schlüsse auf die Restfestigkeiten nach Jahren zu. (Expo'64, Monsanto). Die Abminderung aus Dauerlast wurde mit 1,6 bis 2,0 bewertet
3. Die Abminderung durch Temperatureinfluss wurde geschätzt. Ihr Wert wurde mit ca. 1,2 benannt.

Zu Beginn hatte man über die Größenordnung der Abminderung nur ungenaue Vorstellungen. Man versuchte, pauschale Werte aus vergleichbaren Berechnungen zu übernehmen. Ein solcher Faustwert ist die Gesamtabminderung von 6,0. Er wurde sowohl von Heinz Hossdorf für die Schirme der Expo'64, als auch beim fg 2000 in der ersten Bemessung von Gerhard Dieterich verwendet. Zunehmend gelang es aber, über eine Vielzahl von Versuchen, die meistens von den Herstellern der Kunststoffteile überwacht und finanziert wurden, genauere Werte zu erlangen. Die Gesamtabminderung pegelte sich dann bei ca. 4-5 ein.

Das Verfahren mit Abminderungsfaktoren hat alle anderen Verfahren bis heute überlebt. Das lag darin begründet,

- dass es sich um das Verfahren mit größter Einfachheit und Anschaulichkeit handelt,
- dass später effektivere Verfahren zu einer Zeit veröffentlicht wurden, da das Bauen mit Kunststoffen den anderen Bauweisen Platz gemacht hatte und sie von keinem Anwender mehr rezipiert wurden,
- dass diese anderen Verfahren in Vergessenheit geraten sind.

Die heutigen Bemessungsregeln gehen den Weg auch über Abminderungsfaktoren A_1 bis A_3 , allerdings erfolgt der Nachweis nicht mehr allein über die Spannung, sondern paritätisch über Spannung, Dehnung und Stabilität. Wie für andere Werkstoffe auch hat sich der Nachweis nach Grenzzuständen Ende des 20. Jahrhunderts vollständig durchgesetzt.

Nachweis nach Grenzzuständen

Der Nachweis nach Grenzzuständen fand während der Zeit des Kunststoffbaus bereits in den Ländern des Ostblocks Verwendung. Es werden differenzierte Sicherheiten für die drei Grenzzustände Tragfähigkeit, Nutzungsfähigkeit und Stabilität unterschieden. *Hintersdorf (1973)* und *Ackermann (1972)* sind die wesentlichsten Vertreter dieses Bemessungskonzeptes. Das nötige Abbilden von zeit- und temperaturabhängigem Verhalten der Kunststoffe erfolgt auch bei diesem Verfahren über Abminderungsfaktoren.

Nachweis nach zulässigen Dehnungen

Menges und später Domke von der RWTH Aachen sind die beiden wesentlichen Köpfe dieses Verfahrens, welches die Dehnung anstelle der Spannung als Materialgrenzwert für die FVK einführt. Die Verfahren nach Domke zeichnen sich weiterhin durch eine exakte Abbildung des tatsächlichen Last-Zyklus aus. Auch Ackermann verwendet für seine Bemessung einen realistischen Lastzyklus und bemisst zudem nach Grenzzuständen *Ackermann (1972), (1984)*.

Die Verfahren im Einzelnen

5.3.2 Die Bemessungen der am Bau beteiligten Ingenieure, die Bemessungen der Pioniere

Am häufigsten werden zu Beginn des Bauens mit Kunststoffen die Standsicherheit durch Rechnung und Versuch nachgewiesen. Nachweise allein durch Versuch sowie Schätzungen über vergleichbare Objekte werden nur in einigen Fällen gemacht. Niemals steht ein theoretischer Nachweis allein für die Standsicherheit eines Tragwerkes aus Kunststoffen. Dies zeigt deutlich, in welcher Phase der Anwendung man sich befand - in der Pionierphase.

5.3.2.1 Nachweis durch Rechnung und Versuch

Monsanto House of the Future

1954 beginnt die Arbeit für das Monsanto House of the Future und damit auch die umfassende Berechnung einer tragenden Konstruktion aus FVK. Der Berechnung werden eine Reihe ebenso umfangreicher, praktischer Untersuchungen an die Seite gestellt. Somit gelingt es, das komplizierte Tragwerk, vier 4,80 m auskragende Flügel um einen Betonkern, in allen Details und Belastungskombinationen (7 Stück) zu beherrschen (sh. Abb. unter 2.2 und im Anhang). Eine derart umfas-

sende statische Betrachtung für eine Tragkonstruktion hat es niemals wieder gegeben. Im Anhang sind die verschiedenen Entwicklungsstufen der Tragstruktur und Verbindungsdetails dargestellt, die in der „Engineering Analysis and Structural design of the Monsanto House of the Future Report to Monsanto Chemical Company“ *Dietz (1957a)* veröffentlicht werden. Sowohl in dieser als auch in den anderen Veröffentlichungen ist über die eigentliche Bemessung, den Bemessungsalgorithmus nichts zu erfahren. Gesichert kann gelten, dass der Nachweis als allgemeiner Spannungsnachweis in der Form

$$\text{vorh } \sigma < \text{zul } \sigma \quad \text{bzw.} \quad \text{vorh } f < \text{zul } f$$

geführt wird *Dietz (1957a)*. Es ist anzunehmen, dass die vorhandenen Beanspruchungen nach der Laminattheorie wie in *Sonneborn (1954)* ermittelt wurden. Die Materialien wurden im Kurzzeitversuch getestet und aus einer Reihe möglicher Faser-Harzgemische ausgewählt. Nachdem man sich über das Material einigermaßen sicher war, musste für dieses Material das Kriechverhalten und der Spannungsabfall unter Dauerlast eingeschätzt werden. Man nutzte dazu einen Algorithmus nach *Boller (1956)*, welcher das Formänderungsverhalten über 5 Jahre untersucht. Das Monsanto ist das einzige Kunststoffhaus, das sein eigenes Material über einen so langen Zeitraum getestet hat. Zur Zeit der Veröffentlichung des Final Reports war das Probelaminat des Monsanto schon über 11 000 Stunden, also ca. 2,5 Jahre getestet. Das Laminat wurde für Belastungen von 40–80 % der max. Kurzzeitfestigkeit untersucht. Dabei konnte folgendes festgestellt werden: Bei einer Belastung unter 65 % der max. Kurzzeitfestigkeit (bei 10 000–12 000 Stunden) ist kein Kriecheinfluss mehr festzustellen. Das Formänderungsverhalten infolge Kriechen wurde berechnet nach der Formel

$$e = e_0 (1 + t^n) \quad \text{mit}$$

e Enddehnung nach t Stunden

e_0 Anfangsdehnung (elast. Verformung)

t Zeit in Stunden

$n = 0,0245$ materialabhängige Kriechkonstante, empirisch ermittelt (nach *Boller (1956)*)

Aus den Untersuchungen zum zeitabhängigen Verformungsverhalten wurde geschlossen, dass das Material höchstens mit 25% der im Kurzzeitversuch gemessenen Maximalbeanspruchung belastet werden soll. Verglichen mit dem später gebauten, im Detail berechneten und zugelassenen fg 2000 ist dies ein mutiger Wert. Beim fg 2000 beträgt die zulässige Last 1/7 bzw. 14 % der im Kurzzeitversuch gemessenen Maximalbeanspruchung.

Die Einsicht in die vorhandenen Quellen *Dietz (1957a), (1955)* erlaubt leider keine Schlüsse, wie sich diese Abminderungen ermitteln.

Heinz Isler

Heinz Isler mit seinen europaweit ersten Kunststoffschalen ist nicht nur ein exzellenter Entwerfer, sondern auch ein mutiger Statiker. Im Anhang an einen Artikel von Domke *Domke (52/1977), 210* wird auf einen Beitrag von Heinz Isler zu tragenden Bauteilen aus Kunststoffen hingewiesen. Der nicht genannte Autor würdigt Isler als Pionier in der Anwendung von Kunststoffen für tragende Bauteile, schreibt aber zur Bemessungspraxis Islers:

„Über den Nachweis der Tragfähigkeit für die vorgestellten Bauarten wird wenig gesagt. Auf das zeit- und temperaturabhängige Verhalten, das sich sowohl durch kriechende Verformungszunahme als auch durch einen möglichen Abbau der Bruchfestigkeiten äußert, wird ebenfalls kaum hingewiesen. Man darf vermuten, dass der Nachweis der Standsicherheit durch Belastungsversuche an Modellen, oder am ganzen Bauteil unter Zugrundelegen eines vorsichtig abgeschätzten Sicherheitsfaktors geführt worden ist. Dies ist für erste Bauwerke aus neuen Baustoffen zweifellos das zweckmäßigste Vorgehen.“

Diese Vermutungen lassen sich sowohl bestätigen als auch ergänzen. Festzustellen ist, dass Isler sich kaum zu Berechnungen oder Konstruktionsdetails geäußert hat. Dies gilt für seine Tragwerke aus Kunststoffen, wie aus Beton. Wiederum äußert er sich zu seinen durchgeführten Belastungsversuchen an verschiedenen Stellen *Isler (1975), 6* und *Isler (1977), 19*. Durch großen Zufall konnte in Islers statische Berechnung für das Röhrenhaus Dutler *Isler (1970)* Einsicht genommen werden.

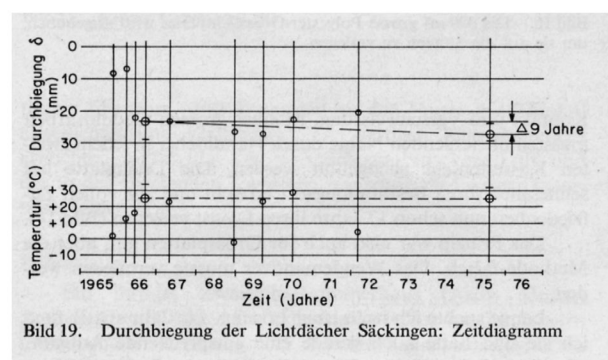
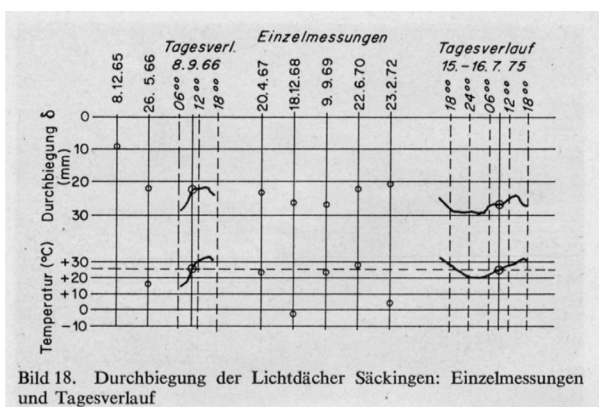
Das Ferienhaus stand bis 1981 in einem Vergnügungspark in Castrop-Rauxel und wechselte anschließend zu einem Besitzer, der es bis 1994 als Bungalow auf einem Zeltplatz in Droste nutzte. Das zuständige Bauordnungsamt verlangte vor Aufstellung eine statische Berechnung von Isler, die ordnungsgemäß von einem Prüfenieur, in diesem Falle E. H. W. Zerna aus Bochum, geprüft wurde. „Die Schalenstatik des Röhrenhauses wurde als wissenschaftliche Aufgabe betrachtet. In einer 10 Seiten langen Herleitung werden die Spannungsgleichungen aus der allgemeinen Membrantheorie mit der Pucher'schen Spannungsfunktion abgeleitet[...]. Die Ermittlung der Membranspannungen erfolgt anhand dieser hergeleiteten Gleichungen, vergleichsweise werden die Spannungsgleichungen für die Zylinderschale nach Girkmann [Girkmann (1959)] herangezogen.“ Genzel/Voigt (2005), 224

Wie aber bestimmte Isler für das Röhrenhaus die Beanspruchungen, die dem Material langfristig zugemutet werden können? Das Bauvorhaben verzeichnet ein Protokoll Dutler (1970), das auf einen Belastungsversuch mit einmal 5 t Auflast auf der Röhre, 5 t Last innerhalb der Röhre und einem Heißluftgebläse von 80–100°C hinweist. Über die Dauer des Versuches wird nichts gesagt, vermutlich sollten mit diesem Versuch die Kurzzeitwerte überprüft werden, die im Leistungsverzeichnis angegeben werden. Zu den Langzeitkennwerten lesen wir „In den statischen Berechnungen sind keine Herstellungstoleranzen berücksichtigt. Für die Festigkeitsverluste infolge Dauerbelastung und Bewitterung (der Außenhaut) sind Abminderungsfaktoren mit 1,2, resp. 1,3 angenommen wurden.“ Dutler (1970), 5

Die Abminderung der Kurzzeitfestigkeit mit $\Sigma A = 1,56$ setzt Isler deutlich unter den üblichen Werten an. Wie konnte Isler sicher gehen, dass diese zaghaften Abminderungen stimmten? Hatte er Dauerlastversuche gemacht, die diese Annahmen bestätigen? Über die selbsttragenden Kassettenplatten für das Wochenendhaus (1959) sagt er: „Langzeitbeobachtungen über Jahre hinaus haben die theoretischen Überlegungen und Berechnungen bestätigt“ Isler (3/1977), 119). Die Platten für das Rheinkraftwerk in Säckingen testete er über 9,5 Jahre (Abb. 136, 137). „Durch Vergleich der Höhenlage bei derselben Temperatur in der Erwärmungsphase lassen sich exakt die Zehn-Jahre Verformungen – also die Kriecheinflüsse feststellen.“ ebenda 121 Isler hat also die entsprechenden Versuche über einen langen Zeitraum und am Objekt selbst gemacht. Mit seinen Annahmen liegt er richtig, was Domke (52/1977) mit seinen genaueren Berechnungen noch beweisen wird.

Abb. 136 links und 137

Durchbiegung der Lichtdächer Säckingen: Zeitdiagramm
Isler (3/1977), 119



Heinz Hosdorf - Expo'64

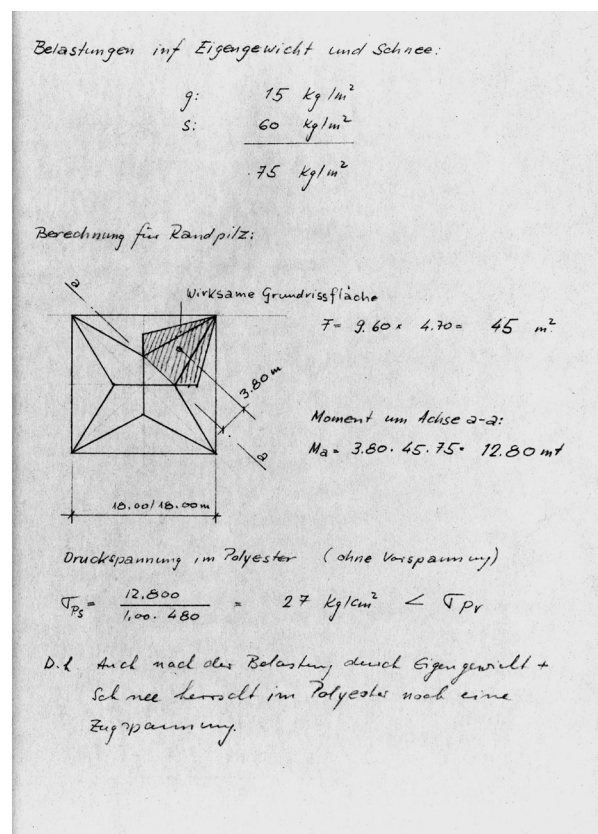
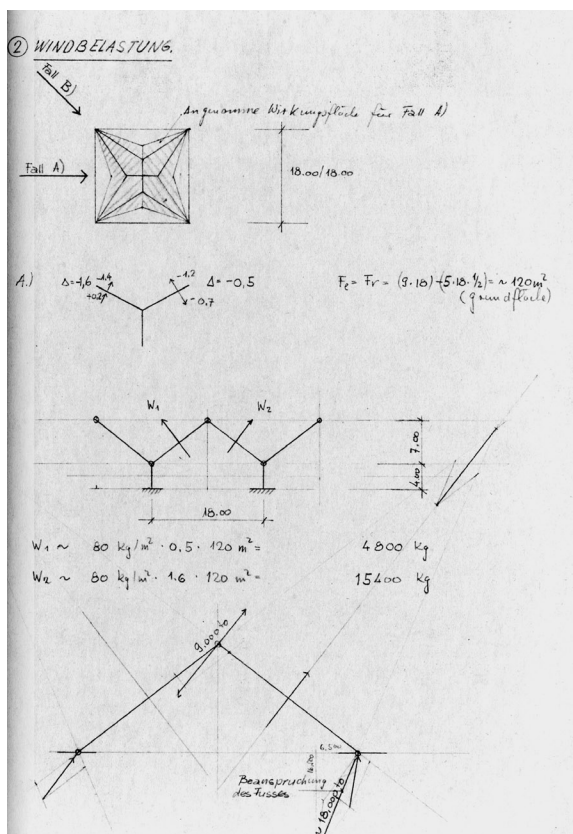
Als Heinz Hosdorf erste Überlegungen zur Überdachung des Eingangsgeländes des „Waren und Werte-Sektors“ der Expo'64 in Lausanne anstellt, weiß er, dass die gewünschte Tulpenfeld-ähnliche Schalenstruktur nicht allein durch Berechnung oder Abschätzung zu bewältigen ist. Einleuchtend sind ihm aber die Probleme, die bei seiner Mischkonstruktion aus GFK-Hyparschalenelementen und Stahlrahmen, beide durch einen Schirmmechanismus vorgespannt, auftreten:

„Leider hat nun Polyester zwei höchst unwillkommene Eigenschaften, derentwegen sich die künstlich aufgebrachten Membranzugspannungen ganz von selbst in bedrohlichem Masse abbauen und damit den praktischen Nutzen des schönen Aufspannprinzips ernsthaft in Frage stellen können: seine gegenüber dem Stahl (dem anderen Verbundbaustoff) beträchtlich höhere Wärmedehnzahl sowie seine Eigenart, sich unter dauernder Zugbeanspruchung über seine elastische Initialdehnung hinaus laufend weiter auszudehnen.“ Hosdorf (2003), 62


Hosdorf entscheidet sich wie Isler, die Standsicherheit seiner Konstruktion maßgeblich durch Versuche nachzuweisen. Dabei liegt sein Hauptaugenmerk neben der Ermittlung von Kurzzeitwerten im Zugversuch darauf, die Spannungsverluste infolge Wärmedehnung sowie das Kriechverhalten abzuschätzen. Die Versuche, sämtlich im Laufe des Jahres 1962 durchgeführt Hosdorf (1963), bezeichnet er selbst als „rudimentär“ - weil mit einfachstem Versuchsaufbau operierend - und „unzuverlässig“ - weil über einen zu kurzen Zeitraum gemessen. Dass das Kriechen nach einer logarithmischen Kurve verläuft, wird zumindest deutlich. Nach dieser Kurve interpoliert er die Kriechverluste für die geplante Standzeit von 3 Jahren. Zu seiner eigenen Sicherheit richtet er noch eine Vorsichtsmaßnahme ein: Jede einzelne Blume erhält einen hydraulischen Zylinder, der im Bedarfsfall jederzeit durch einfachen Anschluss an eine Druckleitung die Schale hätte nachspannen können Hosdorf (2003), 62. Das Nachspannen wird aber nicht nötig.

Die statischen Berechnungen brauchte Hosdorf, um die Bauherren zu überzeugen. Beim Bau eines solchen Tragwerkes im öffentlichen Raum musste eine statische Berechnung vorgelegt werden, obwohl Hosdorf und viele andere Pioniere des Kunststoffbaus, wie Makowski, im Zweifelsfalle den Nachweis immer über experimentelle Untersuchungen erbracht hätten.

Abb. 138, 139 und 140, 141 (nächste Seite)
statische Berechnung für die Expo'64, aufgestellt von Heinz Hosdorf
in seinem eigenen Büro in Basel 1963
Hosdorf (1963), 37, 48, 49 und 50



Temperatureinfluss:



A) Abkühlung

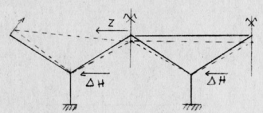
Zugband: Aus Symmetrie-Gründen sind in den Innenstützen die gleiche Länge beide Seiten.

Vergrößerung der Spannung auf $\Delta T = -30^\circ$

$$\Delta \sigma = \Delta \epsilon \cdot E = 30 \cdot 0,012 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 756 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{eff}} = 756 + 420 = 1176 \text{ kg/cm}^2$$

Randstütz



$$Z = 2,01 \text{ cm}^2 \cdot 756 \text{ kg} = 1520 \text{ kg}$$

Diese Zugkraft verteilt sich als Horizontalschub in die Stiefenköpfe der beiden Randstützen.

$$\Delta H = \frac{1}{2} \cdot 1520 = 760 \text{ kg}$$

Angenommenes Horizontalschub im Stiefenkopf.

$$H = 6,500 \text{ to.}$$

$$\Delta H = 11,8 \% \cdot H$$

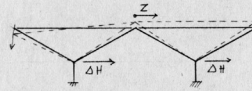
B) Erwärmung:

Zugband: Vergrößerung der Spannung auf $\Delta T = +30^\circ$

$$\Delta \sigma = 30 \cdot 0,012 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^6 = 756 \text{ kg/cm}^2$$

d.h. das Zugband wird spannungsfrei

Randstütz: Spannung im Zugband bleibt



$Z = 2,01 \cdot 420 = 845 \text{ kg}$
(Kraft im Zugband inf. Vorspannung)

$\Delta H = \frac{1}{2} \cdot 845 = 422 \text{ kg}$
 $\Delta H = 6,5 \% \cdot H$

In seiner Statik bestimmt Hossdorf die Kräfte in der Schale und dem Rahmen nach der Elastizitätstheorie für Windbelastung, Vorspannung und Temperaturzwängung (Abb. 138-141). Somit erhält er eine maximale Zugkraft im Polyester aus Vorspannung und Wind von $1,87 \text{ kN/cm}^2$, die er der zulässigen entgegensetzt, dem Produkt aus den eigenen Zugversuchen und einem Abminderungsfaktor 6,0 Hossdorf (1963), 11.

zul $\sigma_{\text{längs,max}} = \sigma_{\text{Kurzzeit}} / 6,0 = 9,3 / 6 = 1,55 \text{ kN/cm}^2$

Hossdorf hält diesen Faktor, den er offensichtlich aus den Kriechversuchen ableitete, heute (2005) für unerklärlich. Die Sicherheit von 6,0 für den Werkstoff wird auch rechnerisch nicht ganz eingehalten, die vorhandene von 4,7 hatte ihn wohl dazu veranlasst, das Vorspann-Sicherungssystem anzubringen.

Yrjö Ronnka - Futuro

Auch beim Futuro ist eine statische Berechnung nachweisbar, der eine Reihe von Versuchen zur Seite gestellt wurden Home (2002), Genzel/Voigt/Suuronen (02-06-2004). Der Ingenieur Yrjö Ronnka fertigte 1967 eine statische Berechnung an. Sie ist derzeit verschollen und nicht einsehbar. Einige Einblendungen aus dem beigelegten Film zum Futuro-Buch von Marko Home Home (2002) zeigen jedoch Teile aus dieser Berechnung, wonach als gesichert gelten kann, dass die Ermittlung der Schalschnittkräfte anhand der Formeln von Girkmann (1959) erfolgte. Bemessungsalgorithmus und Sicherheitskonzept bleiben jedoch ungeklärt. Ob und wie ein Nachweis der Stabilität geführt wurde, lässt sich nicht nachvollziehen. Die Gefahr, dass die Deckschichten des Sandwiches aber unter Last ausbeulen, wurde erkannt. Man begegnete ihr mit einer exakten Herstellungstechnik. Die Kernschichten aus PUR-Schaum wurden exakt vorgeschritten und mit den Deckschichten verklebt, sodass kein Ablöseproblem zwischen diesen Schichten bestand. Die noch existierenden Futuros weisen entsprechend auch keine sichtbaren Beulen auf.

René Walther - Rondo

Das Tragwerk des Systems Rondo ist dem des Futuro ähnlich – eine doppelt gleichsinnig gekrümmte Schale. Man könnte also meinen, sie wäre in ähnlicher Weise hergestellt und auch berechnet worden. Das Rondo wurde zweimal gebaut, als Prototyp 1968, der auf der Internationalen Kunststoffs Ausstellung IKA '71 in Lüdenscheld zu sehen war, und 1972 als vierteiliges Büro-Ensemble für eine Firma in Radewald in Deutschland. Nur für das Büroensemble wurden statische und experimentelle Untersuchungen gemacht. Für die Berechnung wurde der Schweizer Ingenieur René Walther beauftragt, der zu diesem Zeitpunkt weder Erfahrungen mit faserverstärkten Kunststoffen hatte noch die Schalenstatik beherrschte *Genzel/Walther (10.03.2004)*. Walther findet eine Reihe von Ersatzsystemen, mit denen er die genaue Ermittlung der Schalen-Membrankräfte umgehen kann. Die Berechnung des Rondo ist infolgedessen ein Beispiel dafür, wie mit jedem Bauingenieur geläufigen Tragsystemen wie Balken und Dreigelenkbogen ein solches typisches „Ufo“ der sechziger Jahre bemessen werden konnte (Abb. 142, 143).

Auf Seite 10 der Vorstatik wird unter der Überschrift „Vergleich mit den Versuchsergebnissen“ folgendes deutlich: Das geprüfte Element ist keine Schale, sondern lediglich eine Kreisplatte, die nun sicher auf Biegung beansprucht wird. Bei einer Prüflast, die dem 1,5-fachen Wert der tatsächlichen Schneelastannahmen entspricht, zeigten sich weder „Anzeichen plastischer Verformungen noch Anzeichen eines Bruches“. Weiterhin spricht Walther dem Anteil Schneelast ein kurzfristiges Auftreten zu, so dass nach seiner Meinung „das langzeitige Kriechverhalten daher nicht in Erscheinung tritt.“

Hier wurde also nicht nur in der Bemessung, sondern auch in der Versuchsanordnung wesentlich vereinfacht. Dies macht deutlich, wie wenig die Ingenieure über das Verhalten und die Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen wussten.

3. Berechnung

3.1. Dachplatte (Schalenteil A)

Kreisscheibe mit $D = 160\text{ m}$

gerechnet nach R. Bais: Berechnungstafeln für Platten und Wandscheiben Tab. 4.15.5

$$M_r = \frac{q \cdot a^2}{16} (3 + \mu) (1 - \rho^2)$$

$$M_\varphi = \frac{q \cdot a^2}{16} [3 + \mu - (1 + 3\mu) \rho^2]$$

für $a = \frac{D}{2} = 80$, $q = 515 \text{ kg/m}^2$, $\rho = \frac{r}{a} = 0$, $\mu = 0,20$

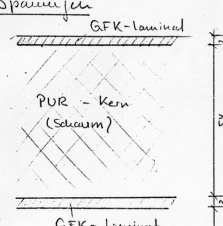
$$M_r = \frac{515 \cdot 80^2}{16} \cdot 3,2 = 67 \text{ kg m}$$

$$M_\varphi = 67 \text{ kg m}$$

Monente in der Mitte der Kreisplatte

$$A = \frac{1 \cdot 0,80 \cdot 515}{2} = 206 \text{ kg/m}$$

Spannungen



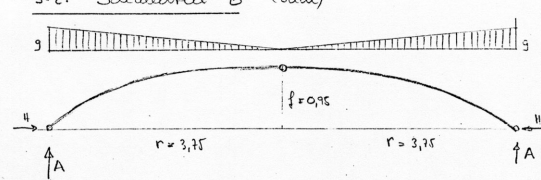
$$J = \frac{100 \cdot 6^3}{12} - \frac{10 \cdot 5^4}{12} = 1800 - 1310 = 490 \text{ cm}^4$$

$$W_o = W_u = \frac{490}{2} = 163 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_o = \sigma_u = \frac{6700}{163} = 41 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau = \frac{206}{100 \cdot 6} = 0,34 \text{ kg/cm}^2$$

3.2. Schalenteil B (Dach)



$$A = \frac{q \cdot r}{2} = 0,515 \cdot \frac{3,75}{2} = 0,97 \text{ t/m}$$

Monent im Scheitel

$$M_{os} = \frac{q \cdot r}{2} \cdot r - \frac{q \cdot r}{2} \cdot \frac{2}{3} r = \frac{q \cdot r^2}{6}$$

$$H = \frac{M_{os}}{f} = \frac{q \cdot r^2}{6 \cdot f}$$

$$H = \frac{0,515 \cdot 3,75^2}{6 \cdot 0,95} = 1,27 \text{ t/m}$$

Druckkraft in der Schale

$$\rightarrow D = \sqrt{A^2 + H^2} = \sqrt{0,94 + 1,61} = \sqrt{2,57} = 1,60 \text{ t/m}$$

Annahme: Druck wird durch GFK-Laminat übernommen

$$\sigma_D = \frac{1600}{100 \cdot 0,6} = 27 \text{ kg/cm}^2$$

Abb. 142 und 143
statische Berechnung für das vierteilige Ensemble Rondo in Radewald (D), aufgestellt von René Walther in seinem Büro in Basel ca. 1970
Vorstatik Rondo

fg 2000

An keinem anderen Beispiel wie beim fg 2000 wird die Geschichte der Bemessung von faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur so deutlich. Die nachfolgenden Aussagen sind Genzel/Voigt (2005), 198 ff. entnommen.

Grundsätzlich werden alle Bemessungen nach den Regeln der klassischen Festigkeitslehre geführt. Es werden Belastungen (Normenwerte) auf das Tragwerk gesetzt und Beanspruchungen ermittelt. Die Beanspruchungen (Momente, Normkräfte) werden den Widerständen ($E \times I$) gegenübergestellt, je nach Fortschreiten des Projektes werden diese Widerstände genauer ermittelt. Aus der Gegenüberstellung von Beanspruchung und Widerstand ergeben sich Spannungen, die kleiner als die zulässigen Spannungen sein müssen.

Die Berechnungen werden ausführlich im Anhang dargestellt.

Der Nachweis der Stabilität wurde in allen Fällen als der entscheidende Nachweis geführt, von den Statikern Dieterich und Langlie aber auf unterschiedliche Art. Das Langzeitverhalten ist anfangs noch geschätzt, später werden die Annahmen durch einzelne Versuche untermauert und letztlich durch großangelegte Versuchsreihen unter bauaufsichtlicher Führung geprüft.

Die im Zusammenhang mit der Bemessung des fg 2000 gefundenen Regeln haben heute noch Gültigkeit und können unverändert angewendet werden. Lediglich die Feinheit und Genauigkeit bei der Erfassung der festigkeitsmindernden Einflüsse für tragende Bauteile aus FVK ist heute verbessert.

Feierbach beabsichtigte, mit dem Bausystem fg 2000 einen großen Markt zu bedienen. Wirtschaftlich konnte dies nur mit einer Serienfertigung sein. Der geschäftstüchtige Feierbach bringt mit seinem Willen zur Serienreife wie kein anderer die Kunststoffforschung voran. Er fand einen Statiker, er musste einen Prüflingenieur finden, dieser regte wiederum andere Ingenieure an, sich mit dem Thema Statik und Bemessung für Bauteile aus GFK zu befassen.

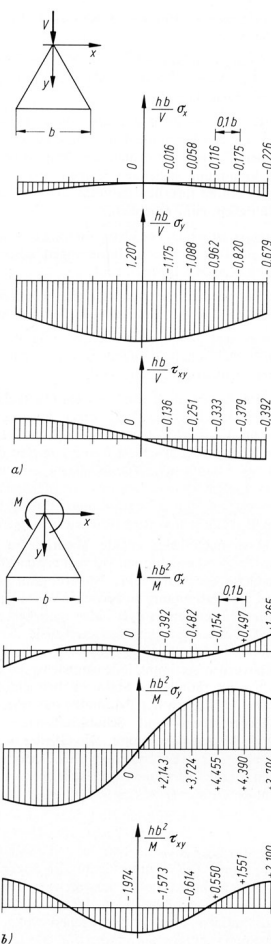
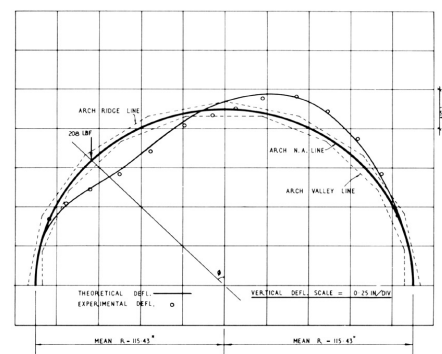
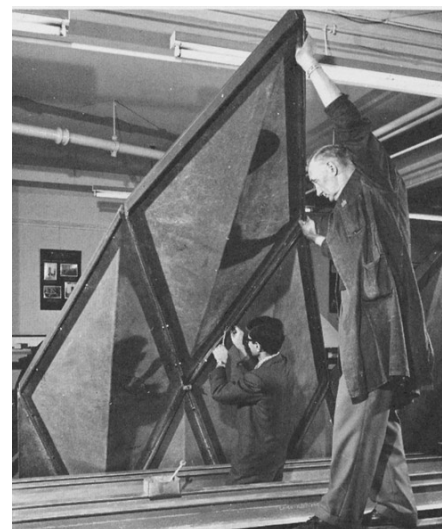


Bild 3.2/35. Spannungsverteilung im dreieckigen Keil einer Pyramide bei verschiedenartiger Belastung

Abb. 144 links

Spannungsverteilung im dreieckigen Teil einer Pyramide bei verschiedenartiger Belastung, ermittelt von Robak und Gilkie an der Universität Surrey *Saechling* (1973), 496

Abb. 145 (re oben) und 146 (re unten): Aufbau und Testergebnisse für Tonnengewölbe aus Faltelementen, durchgeführt von Benjamin unter Leitung von Makowski (im Bild vorn) *Benjamin* (1969), 185 und 189



Makowski und Huybers Faltstrukturen

Auch die Faltstrukturen, die am Institut Surrey unter Leitung von Prof. Makowski entwickelt wurden, sind exzellente Beispiele für das Finden einer geeigneten Tragstruktur durch das Experiment und deren nachträgliche Abbildung durch die Theorie. In einer frühen Veröffentlichung *Makowski (1966), 149 ff.* zeigt er am Beispiel einer Faltstruktur die Suche nach Übereinstimmung von Versuch und Rechnung (Abb. 145, 146).

Zur Berechnung der Raumgitter-Flächentragwerke (Stressed skin space grid) (siehe Abb. unter 4.3.1.3 und 2.2) nutzte Makowski anfangs eine Näherungsmethode und ließ dann durch seine Mitarbeiter *Robak (1970)* und *Gilkie (1967)* an der Universität Surrey weitergehende Grundlagenforschungen durchführen. Gilkie untersuchte die Spannungsverteilung in sechseckigen, Robak in quadratischen Pyramiden. Mit ihren Arbeiten lassen sich die Spannungsverteilung sowie die Beul-lasten in den Pyramiden exakt bestimmen. Aus ihren Versuchen konnten sie ermitteln, dass bereits vorhandene leichte Krümmungen in den Pyramidenwänden zwar den Beginn des Beulens verzögern (wie eine Art Vorverformung), letztlich aber für das endgültige Versagen nicht entscheidend sind (Abb. 144).

Spätere Veröffentlichungen von Makowski und Benjamin befassten sich mit der Bewertung der tragenden Eigenschaften von bestimmten Faltstrukturen in Tonnengewölben und Zwei- oder Dreigelenkrahmen *Saechling (1973), 488*. Die Forschungstätigkeit beruht auf der Überzeugung, dass Faltwerke eine ideale Anwendungsform für Tragwerke aus FVK sind. Durch industrielle Vorfertigung entstehen identische kleine Teile, die durch Faltung eine große Steifigkeit erhalten und somit gut für einschalige Tragwerke geeignet sind. Diese einschaligen Tragwerke erfahren unter Last große Verformungen im Vergleich zur Schalendicke und müssen deshalb nach Theorie II. Ordnung mit nichtlinearen Gleichungen berechnet werden. Diesen aufwändigen Nachweis umgeht Makowski, indem er nach Theorie I. Ordnung ausführliche Rechenverfahren entwickelt, mit denen die Spannungsverteilung an solchen Faltwerken mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann *Makowski / Benjamin (1966)*. Sie gelten auch für Tragwerke aus anderen Werkstoffen als FVK, z.B. aus Aluminium.

Zusammenfassung:

Zu Beginn der Entwicklung basierten alle Standsicherheitsnachweise auf Versuchen, die durch überschlägliche Bemessungen untermauert wurden. Dabei kamen sowohl Versuche an kleinmaßstäblichen Modellen (Isler, Hossdorf), an großmaßstäblichen Modellen (fg 2000), an Vergleichselementen (Rondo - runde Platte) als auch an Prototypen (Hossdorf) zur Ausführung. Exemplarisch gilt die Aussage von Makowski in *Saechling (1973), 486* „Leider weichen die experimentellen und theoretischen Werte ganz erheblich voneinander ab. Nach Meinung des Autors ist der experimentellen Bestimmung der elastischen Konstanten größere Zuverlässigkeit beizumessen als den rein theoretisch gefundenen Werten.“

5.3.2.2 Nachweis allein durch Versuch

Einige Konstrukteure maßen den experimentellen Werten so große Bedeutung bei, dass sie ganz und von vornherein auf eine theoretische Bemessung verzichteten. Sie vertrauten, wenn man so will, auf die Stimme des Materials. Hier sind es vor allem die französischen Kunststoffbauer, die diese Arbeitsweise perfektionierten.

Nach Aussage von Phillip Bancilhon, dem Verfasser eines aktuellen Buches über das Bulle Six Coque *Bancilhon (2003)* und Kenner der Kunststoffhäuser in Frankreich können wir davon ausgehen, dass es keine statische Berechnung des Bulle Six Coque gegeben hat. Bancilhon vertritt die Ansicht, dass die französischen Pioniere des Kunststoffbaus ihre Forschungsarbeiten immer an Prototypen in Originalgröße durchgeführt haben, die die realen Bedingungen tatsächlich abbildeten. Die Tatsache, dass die Häuser klein und eingeschossig sind, erklärt das Fehlen einer statischen Berechnung und die Tatsache, dass kaum ein Statiker konsultiert wurden. Die Versuche an den Prototypen klärten den französischen Ingenieuren die offenen Fragen, nämlich das Zeitstandsverhalten (Kriechen), das Impact-Verhalten (Verhalten bei Stoß), das Verhalten hinsichtlich der Entflammbarkeit und der erforderlichen Wärmedämmung *Bancilhon (24.05.2004)*.

In *Schwabe (1977), 100* finden wir eine weitere Bemerkung, die die Behauptung stützt, dass in Frankreich die Kunststoffhäuser nicht berechnet wurden, wohl aber ihre Standsicherheit durch Bauteilversuche nachgewiesen wurde: „Das CSTB in Paris hat - solange ich es kenne - in Champs sur Marne Bauteilversuche gemacht, die ja letzten Endes echte Funktionsversuche sind, d.h. ob ein Bauteil seine Funktion erfüllt.“ Weiter stellt Schwabe heraus, dass in Deutschland derlei Funktionsversuche nur vereinzelt gemacht wurden, da sie für den Auftraggeber teuer sind und die Kapazität der Versuchsanstalten

belasten.

Hier ist also festzustellen, dass das konstruktive Entwerfen von tragenden Kunststoffbauteilen in Frankreich durch eine experimentelle Nachweisführung gekennzeichnet ist. In Gegenüberstellung mit anderen Bauten kann diese Tatsache als regionale Besonderheit gelten, bedingt durch eine weniger theoretische Haltung zu statischen Problemen sowie die Fähigkeit, die Idee über die Ausführung zu erheben.

5.3.2.3 Ermittlung der Querschnittsabmessungen durch Vergleich und Schätzung

Der Nachweis durch experimentellen Versuch ist bis weit in die 1960er Jahre das probate Mittel der Nachweisführung, entweder allein oder in Kombination mit statischen Berechnungen. Wie aber schätzten die Ingenieure die Abmessungen vorher ab? Nutzten sie vergleichbare Vorbilder und übernahmen oder extrapolierten sie deren Abmessungen?

Ein Abschätzen über Faustformeln war für glasfaserverstärkten Kunststoff kaum zu erwarten. Das Faser-Harz-Gemisch ist in so vielen Varianten möglich, das sich kaum ein Autor traute, aus dieser Vielzahl einige „Standard-Gemische“ herauszuziehen und für diese überschlägliche Faustformeln anzugeben. Was man sich aber traute, war die Orientierung an anderen Vorbildern. Als exemplarisch in dieser Hinsicht lassen sich die drei Ferienhäuser Futuro, Rondo und Bulle Six Coque anführen (Tabelle Ordnung der Tragwerke (TOdT 4.3.2.2-1968/03, 4.3.2.2-1969/01 und 4.3.2.6-1967/02). Etwa zur gleichen Zeit (1968) erbaut, weisen sie ein ähnliches Tragwerk – eine z.T. biegebeanspruchte Schale über einem runden Grundriss von 8 m Durchmesser auf. Der konstruktive Aufbau der tragenden Schalen ist identisch: 2,5 mm Deckschichten aus GFK umschließen einen Kern aus PUR-Schaum von 40 mm *Schwabe (9/1969), 343; Firma König (03-08-1971); Schwabe (1/1971), 5*. Das Bulle Six Coque soll dann zwar tatsächlich mit einem Kern von 100 mm ausgeführt worden sein *Bancillon (2003)*, die Orientierung der Vorbemessung an den Vergleichsbauten ist aber nicht zu übersehen.

Zusammenfassung:

Die Pioniere des Kunststoffbaus, welche selbst Tragwerke aus FVK errichteten und statisch nachwiesen, nutzten bekannte Nachweismuster anderer Werkstoffe für die statische Berechnung der Tragwerke aus FVK. Sie ermittelten die Beanspruchungen nach der Elastizitätstheorie infolge Normlasten. Diese Beanspruchungen (Spannungen und Verformungen) stellten sie den zulässigen gegenüber. Dabei versuchten sie, das zeit- und temperaturabhängige Langzeitverhalten der FVK, so gut es ihnen möglich war, abzuschätzen. In den meisten Fällen vergewisserten sie sich durch einen Kriechversuch unter Dauerlast der Abminderungen, die der gemessenen Kurzzeitfestigkeit vorgeschaltet wurden. Der Kriechversuch dauerte selten länger als 1000 h, die Beurteilung des Festigkeitsverlustes für die gesamte Standzeit wurde nach der 1000 h Kurve gemittelt. Kriechversuche über einen längeren Zeitraum und mit realistischen Lastwechseln sind nicht nachweisbar.



Abb. 147

Die Herstellung der Schalenteile für das Bulle Six Coque erfolgte in der gleichen Halle, wo die originalen Elemente auch geprüft wurden. Diese Tests ersetzen den Statikern eine Berechnung *Bancillon (2003)*

5.3.3 Die Bemessungsverfahren der Theoretiker

Das Verfahren nach Menges

Seit Mitte der 1960er Jahre bis 1977 finden sich vermehrt Veröffentlichungen von Georg Menges und seinen Mitarbeitern vom Institut für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen. Publikationsort sind die Zeitschriften „Kunststoffe“ und „plasticconstruction“. Die für die Bauingenieure erste wesentliche Veröffentlichung ist *Menges (1967)* und stellt eine Überschlagsrechnung vor, die mit einem Grundwert aus Kurzzeitprüfungen und Abminderungsfaktoren für den Einfluss von Temperatur und Belastung arbeitet.

1. Das Überschlagsverfahren (1967)

Menges stellt voran, dass die Kunststoffforschung in den letzten Jahren für alle wesentlichen Kunststoffe Kennfelder der Langzeitbelastung in den in Frage kommenden Temperaturbereichen geliefert hat. Gemeint sind hier eine Reihe von Spannungsdehnungs-Diagrammen (Zeitstandslinien), die am eigenen Institut von *Schwarz (1966)* aus Versuchen rekrutiert und veröffentlicht wurden. Menges hatte es sich zum Ziel gemacht, diese Untersuchungen in eine dem Ingenieur geläufige Sprache zu übersetzen und ihm handhabbare Kennfunktionen in die Hand zu geben. Dazu zählen auf der einen Seite die Bereitstellung von Kurzzeitwerten für E-Moduln und Zugfestigkeiten, und auf der anderen Seite Abminderungsfaktoren, die das Verhalten unter Dauerbelastung, unter erhöhter Temperaturbeanspruchung und unter Medieneinflüssen berücksichtigen. Es werden tabellarisch die Kurzzeit-E-Moduln $E_{c/0,1\text{ h}/20^\circ\text{C}}$ und die Kurzzeitzugfestigkeiten $\sigma_z/20\%$ für eine Reihe verstärkter Thermoplasten und 6 verschiedene glasfaserverstärkte Kunststoffe erfasst, die allesamt einen sehr hohen Glasanteil (mindestens 50%) aufweisen. Dies scheint in dem Maße ausreichend zu sein, da nach Menges eigenen Beobachtungen die Grenzdehnung vom Glasgehalt und der Glasart ziemlich unabhängig ist *Menges (1967)*, 480, eine grobe Vereinfachung, die hier letztlich dazu dienen soll, den entwerfenden Ingenieur nicht mit einer großen Materialmatrix zu überfordern. Diese Grenzdehnung ermittelt sein Mitarbeiter Schwarz aus Langzeitversuchen zu

$$\sigma_{\max/10^3\text{ h}}^3 < 0,5 \sigma_B$$

Somit ist das Verhältnis von Kriechmodul aus dem Langzeitversuch von 10^3 Stunden zum Kurzzeitvergleichswert von 0,1 Stunden

$$\gamma_{10^3\text{ h}} = \frac{E_{c/10^3\text{ h}}}{E_{c/0,1\text{ h}}} = 0,5$$

Anders ausgedrückt, konnte dies für die entwerfenden Ingenieure eine Handlungsanweisung sein, nach der eine Abminderung der Kurzzeitfestigkeit auf die Hälfte dem Langzeitwert entsprechen würde. Für den E-Modul gelten andere Verhältnisse, nämlich

$$E_{c/10^3\text{ h}}^3 \cong 0,7 E_0 \quad \text{und somit}$$

$$\beta = \frac{E_{c/10^3\text{ h}}}{E_0} = 0,7$$

Auch zum Temperaturabfall bei Langzeitbelastung äußert sich Menges. Die nun folgende Feststellung wird von allen anderen Autoren übernommen oder bestätigt. Nach seinen Messungen ergibt sich ein Temperaturabfall von 15% je 20°C , also

$$\delta_{20/40} = 0,85$$

$$\delta_{60/20} = 0,85^2 = 0,70.$$

Das zeitlich veränderliche Verhalten der Kunststoffe ist somit

$$\sigma_{t/\theta} = \gamma \times \delta \times \sigma_B \quad \text{und} \quad E_{t/\theta} = \beta \times \delta \times \sigma_B.$$

Benutzt man diese Kennwerte, so kann man eine Bemessung wie für andere Materialien durchführen. Die Beanspruchungen werden aus den Normlasten nach den Gesetzmäßigkeiten der Elastizitätstheorie bestimmt.

In der Festigkeitsrechnung ist dann nachzuweisen, dass die errechnete Spannung σ_B mit ausreichender Sicherheit S unter dem Lastfall zuzuordnenden Werkstoffkennwert K bleibt.

$$\sigma_B < K/S$$

Hier taucht das als solches benannte **Verfahren mit Sicherheitsfaktoren** zum ersten mal auf. Die Sicherheitsfaktoren werden folgendermaßen vorgeschlagen:

$$S = S_{\min} \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

Der allgemeine, nicht kunststoffspezifische Sicherheitsfaktor S_{\min} beträgt bei ruhender Belastung für Duromerpreßmassen sowie für GFK im Handauflege- oder Spritzverfahren 1,6. Des weiteren ermitteln sich die beeinflussenden Faktoren aus der Abb. 148. Enthalten sind die Abminderungen für Langzeitbelastung S_1 , Temperatur S_2 und als einziges Medium ständige Wasserlagerung S_3 . Veränderungen aus UV-Strahlungen beispielsweise bleiben noch unberücksichtigt. Hingegen zeigt die Abb. 148 eine Aufsplittung der Sicherheitsfaktoren nach der Belastungsart.

An dieser Stelle wird für die vorliegende Arbeit für alle nachfolgenden theoretischen Berechnungsverfahren geltend eine Beispielrechnung geführt: Für den Fall eines biegebeanspruchten Tragwerkes aus GFK-Handlaminat, kaltgehärtet und nicht getempert, an freier Luft gelagert ergäbe sich eine zulässige Spannung von

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_{10^3 \text{ h}}}{S_{\min} \times S_1 \times S_2 \times S_3} = \frac{0,5 \times \sigma_B}{1,6 \times 1,5 \times 1,2 \times 1,0} = 0,17 \times \sigma_B.$$

Die Langzeitfestigkeit beträgt nur noch 17 % der Kurzzeitfestigkeit, rechnet man den allgemeinen Sicherheitsfaktor von 1,6 heraus, dann verbleiben an Langzeitfestigkeit nach 12 Jahren noch 27 % der Kurzzeitfestigkeit, bzw. der Sicherheitsfaktor von Langzeit- zu Kurzzeitbelastung beträgt 3,22. Alle Beispiele sind ohne den Einfluss der Temperatur gemacht worden.

2. Das genauere Verfahren nach der Grenzdehnung (1969/70)

Für genauere Berechnungen schlägt Menges ein anderes Verfahren vor, welches von der Grenzdehnung ausgeht, unterhalb derer keine Werkstoffschädigung eintritt *Menges/Taprogge (1970)*. Bis zu dieser Beanspruchungsgrenze nimmt man einen einheitlichen Kriechmodul an, der temperatur- und belastungszeitabhängig ist.

Menges und seine Mitarbeiter Schwarz, Dolfen und Taprogge an der RWTH Aachen haben sich insbesondere um eine Reihe von Versuchen verdient gemacht, in deren Auswertung für die gebräuchlichen glasfaserverstärkten Kunststoffe Zahlenwerte zur Bemessung zur Verfügung gestellt werden. Während in *Menges/Taprogge (1970)* die neue Methode zusammengefasst dargestellt wird, finden sich das zugrundegelegte Rechenmodell und die nötigen Zahlenwerte in *Menges/Schwarz (1969), 344, Tafel 1*. Gegenüber dem Überschlagsverfahren aus dem Jahre 1967 geht die genauere Methode von Verformungen aus, „da die Verhältnisse übersichtlicher und die Arbeit weniger aufwendig ist. Diese Vorgehensweise wurde [...] als brauchbar und zulässig nachgewiesen“ *Menges/Schwarz (1969), 779*. Die Zahlenwerte aus den Kriechkurven berücksichtigen nun auch den Glasgehalt und die Harzart. Die Bemessung ist mit folgenden Formeln möglich:

bei Zugbeanspruchung und Verhinderung von Rissen

$$\epsilon_{i \max} \leq \frac{\epsilon_{\text{prop}}}{S_F} \approx \frac{0,6\%}{1,1 \text{ bis } 1,4}$$

bei Zugbeanspruchung und Gefahr von Bruch

$$\epsilon_{i \max} \leq \frac{\epsilon_B}{S_B} \approx \frac{1,2 \text{ bis } 1,4\%}{2 \text{ bis } 3}$$

bei Gefahr instabilen Versagens unter Druck

$$\epsilon_{i \max} \leq \frac{\epsilon_{\text{krit}}}{S_{\text{krit}}} \approx \frac{\pi^2}{\lambda^2 (3 \text{ bis } 4)}$$

Im Prinzip ist nur die Bruchgrenzverformung ε_{Bz} von Interesse. Für die an Bedeutung wichtigsten Glasfaserkunststoffe wurde nachgewiesen, „das sich die Verformung [...] bei der sich erste Risse im Verbund bilden, mit zunehmender Zeit asymptotisch Grenzwerten nähern. Für die Bruchgrenzverformung ε_{Bz} ergibt sich ziemlich unabhängig vom Glasgehalt eines glasfaserverstärkten Kunststoffes ein Wert von rd. 1,3 bis 1,4 % und für die erste Ablösung des Harzes von quer zur Verformungsrichtung liegenden Glasfasern ε_{pz} ergibt sich ein Wert von 0,4 bis 0,6 %.“ Für Wasserlagerung und Temperatur rechnet Menges vor diese Werte die in *Tafel 1 Menges/Taprogge (1970), 345* dargestellten Koeffizienten k . Das ist sein ganzes Konzept, zusammengefasst in:

$$\varepsilon_{\text{di}}(20^\circ\text{C}) \times k < \varepsilon_{\text{zul}} \leq \varepsilon_{\text{pz}}.$$

Die Empfehlungen von Schlehöfer zur Berechnung von Behältern (1970)

Für die Bemessung von GFK-Druckbehältern wird ein Verfahren mit erhöhten Sicherheiten vorgeschlagen *Schlehöfer (1970)*. Nach langjähriger Zusammenarbeit erstellen der Arbeitskreis verstärkte Kunststoffe e.V. und die Vereinigung der Technischen Überwachungsvereine eine „Richtlinie für Druckbehälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen“, die im November 1972 erscheint. Darin sind neben anderem folgende Besonderheiten festgehalten:

- Die kleinste zulässige Wanddicke beträgt 4 mm.
- Der Gesamtsicherheitsbeiwert für GFK-Druckbehälter wird vorläufig mit 10,8 festgesetzt und teilt sich in einen vom Werkstoff unabhängigen Sicherheitsfaktor $S = 2,7$ und einen Werkstoffabminderungsfaktor $W = 4,0$ auf.
- Der Werkstoffabminderungsfaktor $W = 4,0$ besteht aus weiteren Einzelfaktoren, die herabgesetzt werden können, wenn durch entsprechende Werkstoffprüfungen und genauere Festigkeitsanalysen eine exakte Spannungsermittlung möglich ist. Dies gilt besonders für den Teilfaktor für das Zeitstandsverfahren, der vorläufig auf 2,0 festgesetzt wurde. Hier müssen in Zukunft Versuche über die Zeitstandsfestigkeit und den Kriechmodul bei einer Belastungsdauer von mindestens 10^3 h weiteren Aufschluss über das Werkstoffverhalten geben.
- Der Werkstoffabminderungsfaktor $W = 4,0$ ermittelt sich aus folgenden Einzelfaktoren:

$W1 = 2,0$	für das Zeitstandsverhalten bei 10^5 h
$W2 = 1,4$	für Alterungserscheinungen infolge Beschickung und Umwelteinflüssen
$W3 = 1,2$	für Anisotropie durch das Verstärkungsmaterial
$W4 = 1,2$	für Inhomogenitäten, bedingt durch das Fertigungsverfahren

Sieht man von dem allgemeinen, sehr hoch gesetzten Sicherheitsfaktor $S = 2,7$ ab, so rechnet man bei Druckbehältern demnach mit einer Langzeitfestigkeit, die 25 % der Kurzzeitfestigkeit entspricht. Dies ist im Vergleich zu den anderen Verfahren (Menges 27 % und später Hintersdorf 31 %) ein ähnlicher Wert. In Anbetracht der spärlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema kann man davon ausgehen, dass die von Schlehöfer angedachte Nachweisführung und die materialtechnischen Kennwerte als Richtwerte genutzt wurden, zumal Behälter nichts anderes sind als Zylinderschalen unter Innendruck und somit für den praktischen Bauingenieur auf einer Ebene mit den gebräuchlichen Schalentragerwerke unter Außendruck. Hintersdorf nennt Schlehöfer auch als einen der Ideengeber für die Bemessung mit differenzierten Faktoren *Hintersdorf (1972), 122*.

Das Verfahren nach Hintersdorf (1966/1972)

Mit seinem Buch „Tragwerke aus Plasten“ legt *Hintersdorf* (1972) eine umfassende Abhandlung über die faserverstärkten Kunststoffe, deren Eigenschaften, Herstellung und Bemessung vor. Nirgends in der Literatur finden sich solch einfach anzuwendende und mit reichlich praktischen, gebauten Beispielen unterstützte Bemessungsalgorithmen, wie in diesem Buch. Dem Buch gehen Publikationen voraus, die bereits Vorschläge zur Dimensionierung enthalten *Hintersdorf* (1966). Eingehend befasst sich Hintersdorf auch mit Sandwichplatten, bei ihm „Stützkernkonstruktionen“ genannt *Hintersdorf* (1965).

Wenn es auch nur wenige gebaute Beispiele von Tragwerken aus FVK in der DDR gab, so waren diese doch in der Ausnutzung des Materials exzellent. Sowohl die Gewächshäuser (TOdT 4.3.3.2-1960(02), die Busbahnhofüberdachung von Chemnitz (TOdT 4.3.3.2-1966) und die Parkgarage (TOdT 4.2.2.1-1961) sind Beispiele höchster Effizienz, deren Bemessung einleuchtend in Hintersdorfs Buch vorgeführt wird. Neben diesen „ausgeführten Plastkonstruktionen“ bietet das Buch Bemessungsalgorithmen für beinahe alle Konstruktionsformen für Tragwerke aus FVK, insbesondere für

einschichtige Konstruktionen:

- Stäbe und Platten (Zug, Druck, Schub, Biegung, Knicken, kombinierte Belastung)
- Kreiszyinderschalen (Innen-, Außen-, Axialdruck, Schub, Biegung, kombinierte Belastung)
- gleichsinnig gekrümmte Schalen (Festigkeit, Stabilität)
- ungleichsinnig gekrümmte Schalen (Festigkeit, Stabilität)

Stützkernkonstruktionen:

- Plattenstreifen (Längs-, Schubspannung, Beulen, Stabilität, Durchbiegung)
- Platten und Scheiben "
- Kreiszyinderschalen (Innen-, Außendruck)
- Kugelschalen (Festigkeit, Stabilität)
- Hyparschalen (Festigkeit, Stabilität)

Wie werden die Nachweise aber geführt? Unterscheidet sich das Verfahren nach Hintersdorf von den anderen, namentlich dem Verfahren nach Menges oder dem späteren Verfahren nach Domke? Vom Verfahren nach Menges unterscheidet es sich nur in der Differenzierung und Wichtung der diversen kunststoffspezifischen Abminderungsfaktoren. Hintersdorf führt die Nachweise nach Grenzzuständen, d.h. es wird kein globaler Sicherheitsfaktor über alle Lastfälle angenommen, sondern spezifische Grenzlastfaktoren werden lastabhängig zugeordnet. Der Nachweis nach Grenzzuständen war in der DDR allgemein gebräuchlich für alle Werkstoffe. Die Grenzlastfaktoren sind in Abb. 150 aus *Hintersdorf* (1972), 123 aufgeführt. Ansonsten entscheidet sich Hintersdorf wie seine Kollegen - oder vielleicht auch wegen seiner Kollegen im Westen - für die Abbildung des kunststoffspezifischen Verhaltens über Abminderungsfaktoren, die der gemessenen Kurzzeitbeanspruchung vorgeschaltet werden. Hintersdorf begründet dies so:

„Die verschiedenen bekannten Verfahren [...] verfolgen das gleiche Ziel: sie [die Spanne zwischen vorhandenen und zulässigen Beanspruchungen] schließlich im rechnerischen Festigkeitsnachweis möglichst einfach und übersichtlich in Form von Sicherheitsfaktoren verwenden zu können. Da auch bei der Dimensionierung von Plastkonstruktionen immer mehr differenzierte Faktoren [*Menges* (1967) [*Schleißer* (1970)] oder direkt Bemessungsverfahren nach Grenzzuständen [*Dieterich* (1968)] [*Gericke* (1969)] angestrebt werden, ist es zweckmäßig, von vornherein diese Entwicklung zu berücksichtigen.“ *Hintersdorf* (1972), 122

Kennzahlen von Konstruktionswerkstoffen

In der Tafel 4.1 werden Kurzzeitkennwerte für 5 verschiedene gebräuchliche glasfaserverstärkte Plaste mit einem Fasergehalt von 25 – 70 % angegeben. Solche Kennzahlen wurden bereits mehrfach veröffentlicht. In Tafel 4.2 (Abb. 149) stellt Hintersdorf jedoch eine Reihe von Effektivitätskennzahlen vor. Durch die massebezogenen Kennwerte wie Reißlänge, oder das Verhältnis E/ζ als Vergleichsmaß für die Durchbiegung infolge Eigenlast, ist eine Wertung gegenüber anderen Baustoffen möglich. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu Stahl ökonomische Konstruktionen nur möglich sind, „wenn der Nachteil der geringen E-Moduln durch eine günstige plastgerechte Gestaltung ausgeglichen wird“. *ebenda* 119

Lastannahmen und Sicherheitsfaktoren

Die Lastannahmen nach TGL sind denen nach DIN 1055 vergleichbar. Die naturgemäß unabwendbaren Lasten, wie Wind und Schnee, sind in der TGL und der DIN sogar zahlenmäßig gleich. Bei den Lasten, die der Einschätzung und Abwägung durch den Menschen bedürfen und die maßgeblich von dessen Sicherheitsbedürfnis geprägt sind, verhält es sich erwartungsgemäß so, dass die genormten Verkehrslasten im Osten Deutschlands unter denen der DIN liegen. Gleiches gilt im übrigen auch für die Grenzlastfaktoren. Wir verwenden heute höhere Grenzlastfaktoren für den Nachweis nach Grenzzuständen, als die damals im Osten gebräuchlichen. Alle erstellten Bauten aus FVK im Osten Deutschlands haben den realen Langzeitversuch bestanden. Sieht man von einigen partiellen Stabilitätsproblemen (Beulen) ab, waren die knappen Sicherheiten demnach ausreichend. Mit ähnlich knappen Sicherheiten realisierte übrigens auch Heinz Isler seine Tragwerke aus FVK, wie die Zylinderschale des Röhrenhauses Dutler Isler (1970).

Bei der Berechnung nach Grenzzuständen werden die Schnittkräfte in Grenzlastfällen zusammengefasst. Die Normlast p wird mit dem Grenzlastfaktor n_i (Tafel 4.4, Abb. 150) multipliziert, daraus ergibt sich die Rechenlast. ΣS_i ist die Summe der Schnittkräfte (N, Q, M).

$$\Sigma S_i = p \times n_i$$

Abminderungsfaktoren

Die Abminderungsfaktoren und das damit bezeichnete Sicherheitskonzept für die Bemessung nach Hintersdorf ist in allen Teilen den Ausführungen von Zöpfel (1970) übernommen. Wie aber kommt Zöpfel zu den Abminderungsfaktoren, welche die Unsicherheiten von der Materialseite her abdecken. Gert Hintersdorf erinnert sich, dass es eine Reihe von Versuchen (Zeitstandsversuche, dynamische Versuche) mit Proben aus GFK gegeben hat, die mit den Kollegen diskutiert wurden Genzel/Hintersdorf (13.10.2005). Im Ergebniss standen die besagten Abminderungsfaktoren, die nach Ansicht von Zöpfel im

Abb. 149

Massebezogene Eigenschaften nach Hintersdorf (1972), 119

Tafel 4.2. Massebezogene Eigenschaften verschiedener Konstruktionswerkstoffe

Werkstoff	Glas- masse- anteil [%]	Dichte ρ [kg/dm ³]	$1/\rho$ [$\frac{\text{mm} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}}$]	σ/ρ [km · kp/kg]	E/ρ [km · kp/kg]	$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$	Richtpreis [M/kg]	$\frac{\text{Preis/kg}}{\sigma/\rho}$ [M/1000 kpm]
PVC	—	1,38	0,72	3,6	182	11,5	4,5	4,00	1,12
PVC, glas- faserverstärkt	30	1,60	0,62	8,6	530	16,9	5,9	8,00	0,85
GUP, faser- harzgespritzt	25	1,40	0,71	5,0	500	18,9	6,3	9,00	1,80
GUP, matten- verstärkt	30	1,47	0,69	7,2	580	19,8	6,4	10,50	1,45
GUP, gewebe- verstärkt, $k_{II} = 0,5$	50	1,67	0,6	10,8	1020	24,7	7,1	35,00	3,25
GUP, gewebe- verstärkt, $k_{II} = 0,9$	60	1,78	0,56	29,2	1685	30,8	8,1	38,00	1,30
GUP, roving- verstärkt, $k_{II} = 1,0$	70	1,93	0,52	41,5	2070	32,8	8,2	10,00	0,24
Harte Faser- platten	—	1,00	1,00	2,5	400	20,0	7,4	0,80	0,32
Asbestzement	—	1,9	0,53	0,6	1000	22,9	6,5	0,50	0,84
Stahl St38	—	7,8	0,13	4,9	2690	18,6	3,5	2,00	0,41
AlMg3F26	—	2,66	0,38	9,8	2630	31,4	7,2	6,00	0,61
Kiefernholz	—	0,56	1,8	14,3	1785	56,5	17,9	2,00	0,14
Hartschaum	—	0,02	50,0	0,5	20	31,5	37,0	5,00	10,00
Papierwabe	—	0,019	53,0	1,6	385	142,0	102,0	5,00	3,10
Beton	—	2,2	0,45	0,7				0,05	0,07

besten Falle eine „Diskussionsgrundlage“ sein konnten. „Es wäre wünschenswert, von Fachleuten der Baustoff-Forschung ausreichend statistische Unterlagen erarbeiten zu lassen, die die Gegebenheiten der Praxis genauer erfassen und schließlich zu verbindlichen Standardfestlegungen der Werkstoffkennwerte führen müssen.“ Zöpfel (1970), 767 Diesem Wunsch tragen die Herren Ackermann und Domke in Teilen Rechnung, wie an späteren Ausführungen in dieser Arbeit noch erkenntlich wird. Vergleicht man die bei Hintersdorf übernommenen Sicherheitskennwerte mit bereits erörterten, wie denen von Menges (6/1967), so „ist mit ihnen eine etwas weitergehende Möglichkeit der Werkstoffausnutzung erkennbar, ohne dabei die notwendige Vorsicht außer acht zu lassen.“ Zöpfel (1970), 770

Die Tafel 4.5 (Abb. 151) gibt Auskunft über die Abminderungsfaktoren für FVK.

Die Faktoren

k_1 und k_2

sind neu im Vergleich zu anderen Verfahren. Sie müssen immer berücksichtigt werden.

Mit dem Faktor k_1 findet die Anzahl der Mattenlagen Berücksichtigung. Dieser Faktor ist, unabhängig von den verbesserten Herstellungsbedingungen, auch heute noch nötig. Der Anpassungsfaktor k_2 unterscheidet die Nachweise Festigkeit und Stabilität. Für den Nachweis der Stabilität spielen Maßtoleranzen und Vorverformungen eine größere Rolle.

Die Faktoren

k_3 , k_4 , k_5 und k_6

sind bereits aus anderen Verfahren bekannt.

Die Faktoren k_3 für Temperaturbeanspruchung und k_4 für Wasserlagerung stimmen zahlenmäßig mit denen von Menges exakt überein. Für die Dauerbelastung schlägt Menges den Faktor k_6 mit dem Wert $1,5/0,5 = 0,33$ vor. Er gilt bei ihm für alle Belastungen sowie Faserarten und -gehalte vor, während Hintersdorf differenzierter vorgeht und minimal 0,22 für Zug und Gewebe und maximal 0,50 für Biegung und Mattenverstärkung vorschlägt. Eine Abminderung für Beanspruchung durch verschiedene Medien, speziell UV-Licht, wird beim Verfahren nach Menges nicht vergeben. Hintersdorf hingegen schlägt den Medienfaktor $k_5 = 0,8$ vor.

Tafel 4.4. Grenzlastfaktoren

Lastart	Grenzlast-faktor n_i	Bemerkungen
Eigenlasten Schneelast	1,4	Wirkt sich eine Verringerung der Eigenlasten ungünstig aus, so ist $n_i = 0,9$ Eigenlast + Schneelast = Dauerlast
Windlast	1,2	für Wohn- und Gesellschafts-, Landwirtschafts- und Industriebauten
Windlast	1,3	für turmartige Bauwerke mit Höhe zu kleinster Breite ≥ 5
Verkehrslasten*)	1,2...1,4	$n_i < 1,4$ nur für Verkehrslasten, deren Maximalwert kurzfristig wirkt
Sonderlasten	1,1	

*) Siehe TGL 20 167.

Die weiterhin angezeigten Faktoren

k_7 , k_8 und k_9

sind nur bei dynamischen oder stoßartigen Belastungen zu erfassen und tragen der Tatsache Rechnung, dass der FVK im Impact-Verhalten empfindlicher reagiert als beispielsweise Stahl.

Für den Fall eines biegebeanspruchten Tragwerkes aus GFK-Handlaminat, kaltgehärtet und nicht getempert, an freier Luft gelagert, 30% Faseranteil, 3 Lagen Matte, Temperatur 20°C, würde der Nachweis im Grenzzustand folgende Tragfähigkeit ergeben:

$$\frac{B}{\sum S_i} \geq \frac{n_i}{k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 \times k_6} = \frac{1,4}{0,90 \times 0,95 \times 1,0 \times 0,8 \times 0,50} = 4,5 \times B$$

n_i Grenzlasterfaktoren

S_i Schnittkräfte (N, Q, M)

B Beanspruchbarkeit

k_m Abminderungsfaktoren

Abb. 151

Abminderungsfaktoren nach *Hintersdorf (1972), 123*

Tafel 4.5. Abminderungsfaktoren für Bauteile aus GUP

Einflußart	Verstärkungswerkstoff	Abminderungsfaktor k_m		Bemerkungen
		m		
Gleichmäßigkeit	1 Lage Matte	1	0,75	zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Flächenmasse der Verstärkung
	2 Lagen Matte		0,85	
	3 Lagen Matte		0,90	
	Gewebe		0,95	
Anpassung		2	Festigkeit	Anpassung an besondere Bedingungen: statisches System, Toleranzen der Profile, Fehlerhebel, Vorbeulen
			0,95	
Temperatur		3	Stabilität	
			0,8...1,0	
			0 °C	
			20 °C	
			40 °C	
Wasserlagerung		4	60 °C	gilt für ständig im Wasser lagernde Bauteile
			80 °C	
			0,50	
Alterung		5	0,80	Abbau der Festigkeit durch atmosphärische Einflüsse, Schutzmaßnahmen (Gelcoat, Anstriche) sind erforderlich, Abminderung entfällt für Stabilitätsnachweis
Dauerbelastung	Matte Rovinggewebe Gewebe	6	Biegung	zur Festigung einer Belastungshöhe, bei der praktisch keine Materialschädigung durch Kriechen eintritt
			Zug	
			0,50	
			0,45	
Schwellbelastung		7	0,43	bei $n_i = 1,4$ und zusammen mit $k_1 \dots k_8$ anwendbar; gilt nur bei glatter Oberfläche und Gestaltung ohne Kerbwirkung
			0,31	
Wechselbelastung		8	0,26	
Häufige Stoßbelastung		9	0,22	

Nach Hintersdorf beträgt die Langzeitfestigkeit nur noch $(1/4,5)=0,22$ also 22 % der Kurzzeitfestigkeit, rechnet man den Sicherheitsfaktor von 1,4 heraus, dann verbleiben an Langzeitfestigkeit nach 12 Jahren noch 31 % (statt 27 % nach Menges). Damit werden die Tragwerke, bemessen wir sie nach Hintersdorf, um etwa 10-15 % besser ausgelastet als nach Menges, was an der Differenziertheit der Abminderungsfaktoren liegt. Keine grundlegende, aber doch nicht unbedeutende Verbesserung. Hintersdorf kommt vielleicht nicht das Verdienst zu, alle zeit-, temperatur- und lastabhängigen Veränderungen erfasst und bis ins Detail untersucht zu haben, er fasst jedoch die bisherigen Untersuchungen und Forschungen soweit zusammen, dass es dem mit FVK unerfahrenen Bauingenieur problemlos möglich ist, die Tragwerke sicher und effizient zu bemessen.

Das Verfahren nach Domke

Eine gravierende Verbesserung zu allen bisherigen Verfahren hinsichtlich Materialausnutzung stellt das Verfahren nach Domke dar. Es unterscheidet sich von den anderen Verfahren durch drei wesentliche Innovationen.

1. Domke verwirft die bis dato üblichen Sicherheits- bzw. Abminderungsfaktoren als zu ungenau und entwirft eine genauere Methode, um die verbleibenden Restfestigkeiten des FVK unter Dauer- und Temperaturbelastung zu bestimmen. Prinzipiell führt Domke seinen Nachweis mit dem gleichen Ziel wie alle anderen: Die Beanspruchungen der Konstruktion müssen unter den zulässigen liegen und die zeitabhängigen Veränderungen müssen dabei erfasst werden. Er mindert aber nicht die zulässigen Beanspruchungen ab, sondern erhöht die vorhandenen Beanspruchungen auf der anderen Seite der Gleichung, indem er den DIN-Normlasten weitere kunststoffspezifische Zusatzlasten hinzufügt. Das Kriechen unter dauernder Beanspruchung wird durch eine modellhafte Last erzeugt, die er Kriechlast nennt. Diejenige Last, welche eine Verformung infolge erhöhter Temperatur ($> 20^{\circ}\text{C}$) erzeugt, nennt er (nicht Temperaturlast, sondern) Kriechtemperatur.
2. Das Verfahren nach Domke versucht eine Ablösung vom Versuch und Hinwendung zur Modellvorstellung. Bislang gewinnen alle Autoren und Konstrukteure die Zahlenwerte für die zeitabhängigen Veränderungen aus Zeitstandskurven, also durch Versuche. Fehlte die Zeit für längere Belastungsversuche (10^5 h), so extrapolierte man die Kurve aus den Kriechversuchen über 1000 (10^3) h, eine 1973 von Ulrich Einsfeld von der deutschen Bauaufsicht verordnete Vorgehensweise *Einsfeld (1/1973)*. Domke gewinnt alle Zahlenwerte für die zeitabhängigen Veränderungen aus „einem neu entwickelten struktur-rheologischen Modell, mit dem das tatsächliche Verformungs- und Bruchverhalten der für tragende Konstruktionen geeigneten Kunststoffe mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden kann.“ *Domke (3/1977), 205* Das ursprüngliche einfache rheologische Drei-Parameter-Modell seines ersten Aufsatzes (Abb. 152) zeigt eine Kombination von Federn und Dämpfern. Es ahmt das viskoelastische Verhalten der Kunststoffe nach und ist folgendermaßen aufgebaut: Die Feder E_1 und Dämpfer η_1 sind in Parallelschaltung angeordnet und stellen das Verhalten von festen Körpern mit elastischen Formänderungen nach, die Feder E_0 verdeutlicht das Verhalten viskoser Flüssigkeiten.
3. Domke verwendet wie Menges als kritische Grenze die Dehngrenze des Materials. Er löst explizit nur die Formänderungsaufgabe.

Domkes Rechenmodell musste mehrfach modifiziert werden.

„Der Nachteil diesen einfachen Modelles ist es, daß es keine Erklärung gibt für die im Zusammenhang mit den Kriecherscheinungen auftretenden Festigkeitseinbußen. Ebenso wenig läßt sich mit seiner Hilfe der Zeitpunkt für das Eintreten des Bruchs in Abhängigkeit von Last und Temperatur veranschaulichen und darstellen. Dieser Mangel, der eine eindeutige theoretische Voraussage des Werkstoffverhaltens in diesen für den Bauingenieur besonders wichtigen Fragen nicht zuläßt, war die Veranlassung zu den im folgenden beschriebenen Erweiterungen des rein rheologischen zu einem struktur-rheologischen Modell.“ *Domke (3/1977), 104*

Das in Abb. 153 dargestellte Modell zeigt eine Aufspaltung der Federn. Es werden festigkeitsabhängige Sollbruchstellen eingeführt,

„die wirksam werden, wenn die unterschiedlich langen Federn ausgereckt sind. Die jeweils ausgereckten Federn ziehen die gesamte Beanspruchung σ_0 auf sich, so daß sie an den begrenzt tragfähigen Sollbruchstellen abreißen und damit ausfallen. Gleichzeitig wird die mögliche Ausziehlänge des Dämpfers so begrenzt, daß er am Ende des Kriech-

vorgangs wie der Pfropfen aus einer Flasche herausgerissen wird. Dieses Herausreißen des Dämpfers beschreibt den Langzeitbruch.“ *Domke (3/1977), 104*

Mit den verfeinerten Modellen errechnet Domke die Kriechlast und die Kriechtemperatur. Er läßt sich von seinem Kollegen im gleichen Hause, Georg Menges, inspirieren, „die Dehnung statt der Spannung als wesentlichen Materialkennwert einzuführen“. *Domke (5/1975), 196* Um auf das Endkriechmaß zu kommen, setzt er seine Modelle dem tatsächlich erkannten charakteristischen Belastungsablauf für die Hauptlasten Wind und Schnee aus. Er nimmt drei klimatisch unterschiedliche Standorte (Münster 64 m üNN, Aachen 202 m üNN und Kahler Asten 836 m üNN) und lässt sich die meteorologischen Daten vom deutschen Wetterdienst durchgeben. „Die Häufigkeitsverteilung des Windes wurde jeweils für ein Jahr angesetzt. Als gesamte Lebensdauer wurden dabei 10 Jahre betrachtet.“ *Domke (5/1976), 177* (Abb. 154). Für Schnee „lagen die Ganglinien der Schneehöhen der Jahre 1955 bis 1972 zugrunde“ (Abb. 155) Auch diese setzt er für 10 Jahre an. Zur Berücksichtigung des Temperaturablaufes auf das Kriechverhalten erfasst er gleichermaßen die Daten aus den „Deutschen Meteorologischen Jahrbüchern“: Die Sonnenscheindauer und die mittlere stündliche Strahlungstemperatur dazu (Abb. 156a). Auch diesen Lastwechseln wird das Modell 10 Jahre ausgesetzt.

Was Domke in Auswertung seines Verfahrens erhält, sind genaue Werte zur Einschätzung des Kriechverhaltens unter Last und Temperatur. Sie ermöglichen eine wesentlich effektivere Bemessung von Kunststoffkonstruktionen ohne Sicherheitsverlust. *Langlie (1978)* weist am Beispiel des fg 2000 eindeutig nach, dass nach dem Verfahren Domke eine Bemessung zu vertreten ist, die gegenüber herkömmlichen Verfahren um die Hälfte günstiger abschließt. Im Anhang werden die unterschiedlichen Bemessungsverfahren für das Wohnhaus fg 2000 tabellarisch gegenüber gestellt werden.

Domke stellte sein neues Verfahren in anschaulicher Form in der Zeitschrift „Der Bauingenieur“ vor *Domke (52/1977)*. Damit konnte auch ein im Umgang mit FVK wenig geübter Ingenieur bemessen. Im Artikel wird das Verfahren anhand von Beispielen erläutert. Der Artikel enthält auch die nötigen Kurzzeit-Kennwerte sowie die Einzelfaktoren zur Ermittlung von Kriechlast und -temperatur. Das unten dargestellte Rechenbeispiel verdeutlicht den Rechengang.

Das Verfahren nach Domke wurde für die Anwender zu spät entwickelt. Zwar hatte Domke zwischen 1975 und 1980 staatliche Geldgeber gefunden, um das Forschungsvorhaben anzuschieben. Das Vorhaben wurde vom Innenminister des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert. Nach 1980 flossen keine Gelder mehr. So sind die Ergebnisse des groß angelegten Verfahrens auf die Werte der drei erwähnten Standorte sowie fünf GFK-Mattenlamine beschränkt. Die Untersuchungen hätten weitergeführt werden müssen, um die vorgeschlagenen Zusatzlasten (Kriechlast und -temperatur) für Deutschland und weiterhin für Europa umfassend zu ermitteln und in einer Übersicht, ähnlich den Schneelastzonen der DIN 1055, an die Seite zu stellen.

Abb. 152 (links) und 153
einfaches und verändertes reologisches Modell nach *Domke (3/1975)* und *Domke (3/1977)*

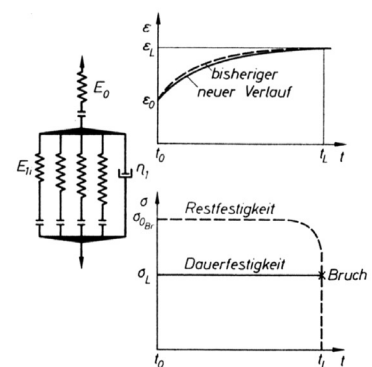
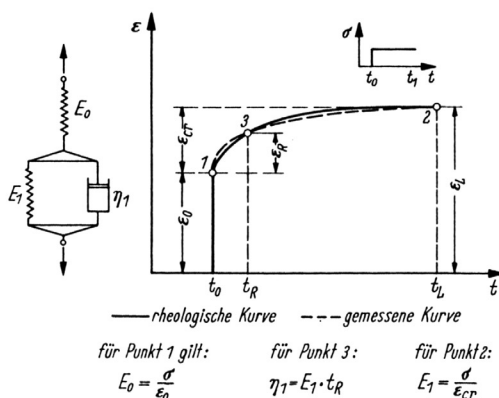
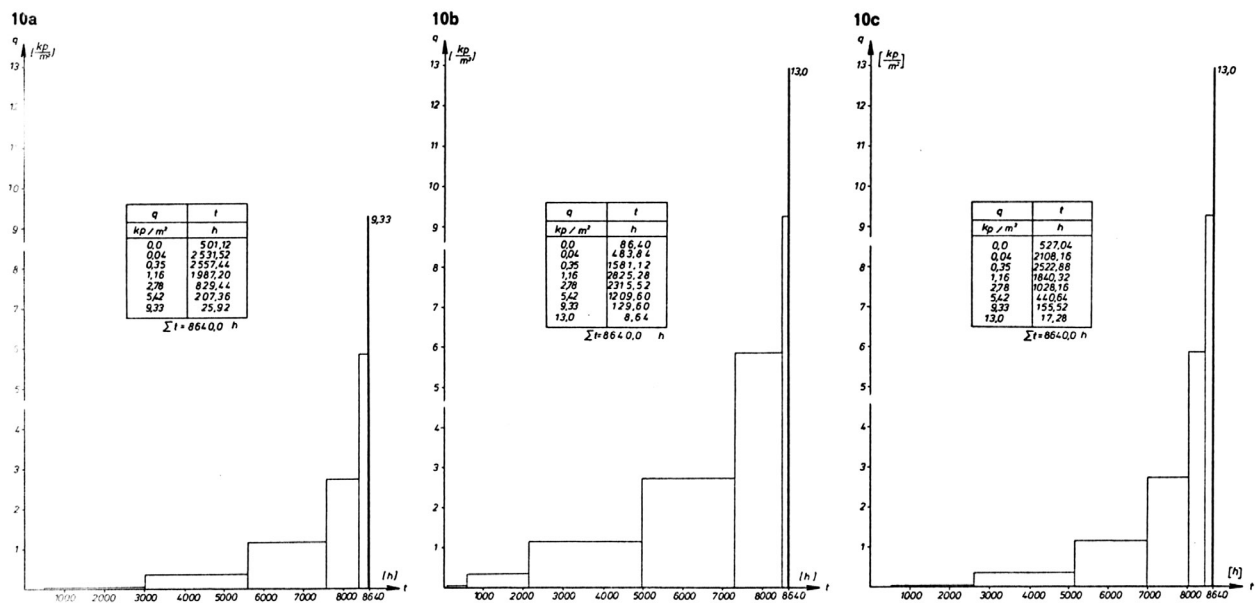


Bild 2. Modellentwicklung, 1. Stufe.



Im Zuge der aktuellen Bestrebungen zur Etablierung von Bemessungsregeln für tragende Bauteile aus FVK könnte die Erstellung einer solchen Kartierung standortabhängiger Faktoren noch einmal angestrebt werden. Der große Rechenaufwand für das Verfahren nach Domke zur Bereitstellung deutschlandweiter und europaweiter Werte ließe sich heute mit moderner Rechentechnik durchaus bewältigen.

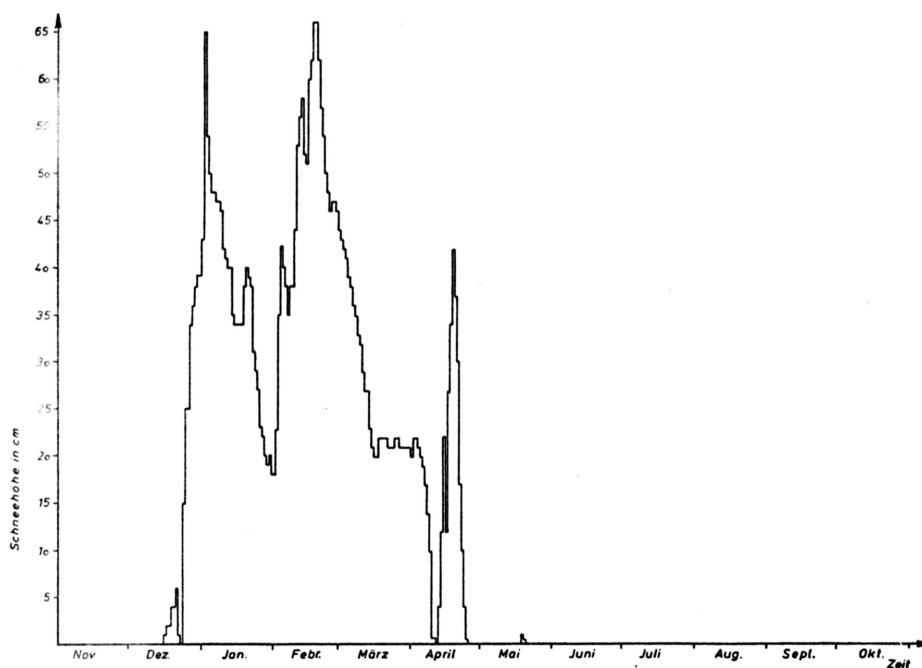


Abb. 154 (oben)
links: Häufigkeitsverteilung der Windlasten für Aachen: 1951 bis 1960; mitte: Häufigkeitsverteilung der Windlasten für Münster: 1953 bis 1960; rechts: Häufigkeitsverteilung der Windlasten für Kahler Asten: 1955 bis 1960

Abb. 155
Schneehöhenanglinie bei Station Kahler Asten für Winter 1968/69 nach Domke (5/1976), 177 und 179

Ablauf der Berechnung: Domke (52/1977), 205

Geführt am Beispiel des biegebeanspruchten Tragwerkes aus GFK-Handlaminat, kaltgehärtet und nicht getempert, an freier Luft gelagert, 30% Faseranteil, 3 Lagen Matte, Temperatur 20°C, Standort Aachen (202 m üNN)

1. Material: GF-UP-M 0806

$E_0 = 600 \text{ (kN/cm}^2\text{)}$ Tab. 1 Kurzzeit-E-Modul

$\beta_z = 8 \text{ (kN/cm}^2\text{)}$ Tab. 2 Kurzzeitfestigkeit (Zug)

$\varphi = 0,7$ Tab. 2 Kriechzahl für 23°

Abminderungsfaktoren für Alterung und Herstellungsbedingungen (angelehnt an die anderen Autoren, aber unter Maßgabe exakter Herstellung):

$$A_2 = 1,0 \quad A_4 = 1,0$$

Allg. Sicherheitsfaktor

$$S = 2,0$$

Lastannahmen:

Höchstlasten (q aus DIN 1055 (Eigengewicht, Wind, Schnee)

Kriechlasten q_{cr} aus Tab. 6

Schnee, Aachen, SLZ II = Höchstlast / Kriechlast = $[(q / q_{cr})]$

zulässige Spannung

$$\text{zul}\sigma = \frac{\alpha_0 \times \beta_z(23^\circ)}{S \times (1 + 2 \times \frac{q_{cr}}{q} \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

Es soll hier eine Gegenüberstellung mit den herkömmlichen Verfahren mit Abminderungsverfahren erfolgen Domke (52/1977), 28

$$\text{zul}\sigma = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{S \times A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4}$$

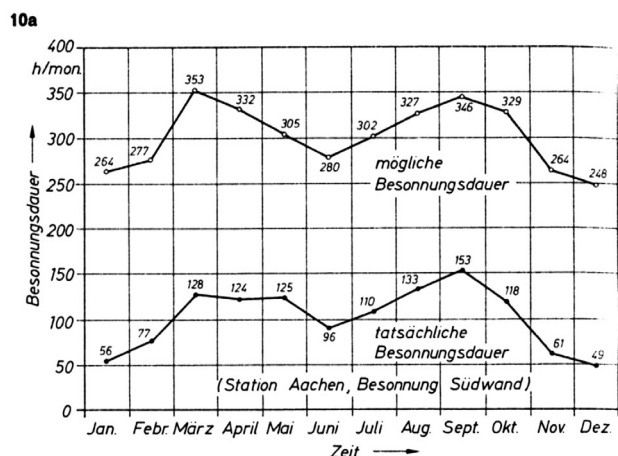
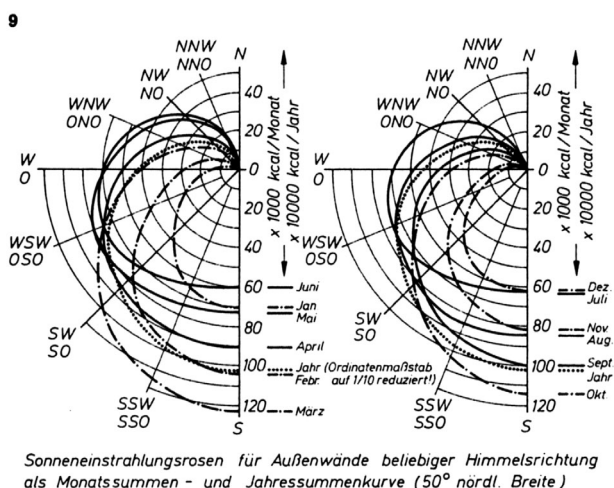
bisherige Verfahren :

nach Einsetzen und Annahme $A_2 = 1,0$ und $A_4 = 1,0$:

Abb. 156a und b

links: Sonneneinstrahlungsrosen für Außenwände beliebiger Himmelsrichtung als Monats- und Jahressummenkurve

rechts: Vergleich möglicher und tatsächlicher Besonnungsdauer für Station Aachen, 1953 bis 1960 nach Domke (2/1977), 56



$$\text{zul}\sigma = \frac{\beta_z}{S \times A_1 \times A_3} = \frac{\alpha_0 \times \beta_z}{S \times (1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}$$

daraus folgt

$$A_1 \times A_3 = \frac{(1 + 2 \times n \times \varphi \times \alpha_\varphi)}{\alpha_0} = \frac{(1 + 2 \times 0,31 \times 0,7 \times 1,0)}{1,0} = 1,434$$

bzw.

$$\text{zul}\sigma = 1,434 \times \beta_z$$

Die Langzeitfestigkeit beträgt nach Domke demnach noch $(1/2,0 \times 1,434) = 0,34$ also 34 % der Kurzzeitfestigkeit, rechnet man den Sicherheitsfaktor von 2,0 heraus, dann verbleiben an Langzeitfestigkeit nach 12 Jahren noch 69 % (statt 27 % ermittelt mit dem Verfahren nach Menges und der 31 % ermittelt mit dem Verfahren nach Hintersdorf).

Das Verfahren nach Ackermann (1972/1982)

Ohne Kenntnis von den Entwicklungen und Verfahren im Westen Deutschlands erarbeitet Ackermann an der Hochschule in Weimar Bemessungsempfehlungen für Tragwerke aus FVK. Sie entstanden etwas früher als die Algorithmen nach Domke. In Genauigkeit und Effektivität stehen die Regeln von Ackermann denen von Domke in nichts nach. Ackermann war leider weit weniger bekannt als seine Kollegen in der BRD.

Das Bemessen von Tragwerken aus FVK nach der Viskoelastizitätstheorie ist für Ackermann (1972) eine Voraussetzung, die er als Mitgestalter auch in den aktuellen Vorschriften, den *BÜV-Empfehlungen (2002)*, 26 formuliert: „Die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Verformungen, Schnittgrößen und Spannungen sind im allgemeinen unter Beachtung der Theorie der Thermoviskoelastizität und Thermoplastizität zu berechnen.“ Diese für den Bauingenieur nach eigener Aussage fast unzumutbare Aufgabe geht er selbst bereits am Beispiel eines einfachen Stabes unter Druck und Biegung an Ackermann (1972). Wie Domke modelliert er das viskoelastische Verhalten des FVK durch eine Aneinanderreihung von Federn und Dämpfern (Abb. 157). Untersucht werden Stäbe nach Theorie erster und zweiter Ordnung. Als Belastungsfunktionen werden nicht nur eine volle Dauerlast a), sondern auch eine ansteigende Dauerlast c) und die für Schnee und Wind so wesentliche begrenzte Dauerlast b) angesetzt (Abb. 158). Als Ergebnis der damals noch mühseligen Arbeit am Großrechner erhält Ackermann sogenannte Multiplikatoren. Diese entsprechen den sonst üblichen Abminderungsfaktoren. Sie werden in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur angegeben. Abb. 159 und 160 zeigen die Multiplikatoren für einen biegebeanspruchten, nicht vorverformten Stab. Es besteht also beispielsweise die Möglichkeit, für eine Schneelast, angesetzt über einen Monat, oder eine Windlast, die 10 h anzusetzen ist, den Kriechanteil für genau diese Zeit zu bestimmen bzw. zu interpolieren.

Abb. 157

Federn-Dämpfer-Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens FVK nach Ackermann (1972), 24

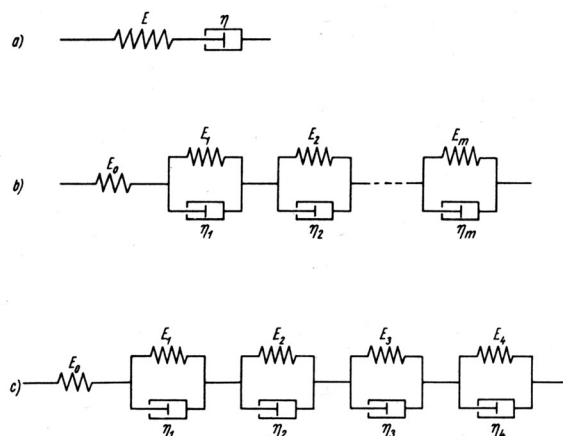


Bild 13

Modelle zur Darstellung linear viskoelastischer Grundgleichungen

- a) Maxwell-Modell
- b) verallgemeinertes Kelvin-Modell
- c) Berechnungsmodell für GUP

Bild 14

Stückweise verschieden definierte Funktionen der Belastungseinwirkung

- a) Sprungfunktion (Heaviside-Funktion $H(t)$)
 b) begrenzte Sprungfunktion
 c) stetig ansteigende und dann konstante Funktion

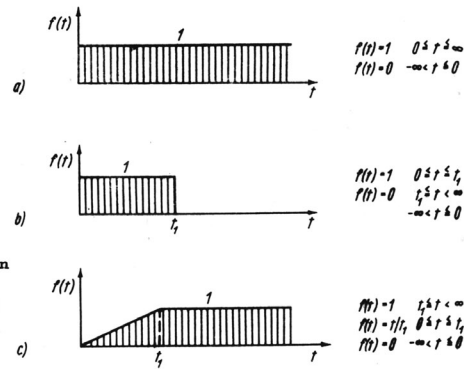


Abb. 158

Ackermann unterscheidet verschiedene Belastungsfunktionen bei der Modellierung Ackermann (1972), 27

Auch in der etwas allgemeineren Berechnungsempfehlung, die die Nachweise in den Grenzzuständen Tragfähigkeit, Stabilitätsverlust und Nutzungsfähigkeit führt, ist die Kriechverformung abhängig von Zeit und Temperatur bestimmbar. Hier nennt man die Faktoren Anpassungsfaktoren (Abb. 161). Grundslegend geht Ackermann aber davon aus, dass in Entlastungsphasen eine vollständige Kriechrückbildung stattfinden kann.

Ackermanns effiziente Berechnungsmethoden wurden nur von wenigen wahrgenommen. Das lag vor allem

- an der Tatsache, dass er keinem Forschungsverbund angehörte, welches sich ausschließlich oder im Besonderen mit Tragwerken aus FVK beschäftigte,
- an der geringen Veröffentlichungsdichte in westlichen Publikationen (im Gegensatz zu Hintersdorf),
- an der Komplexität und dem damit verbundenen Arbeitsaufwand seines Verfahrens.

Ackermann bedauert auch heute, dass in den gültigen Normen die von ihm als wesentlich erachteten zeitabhängigen Veränderung des FVK auf beiden Seiten, nämlich auf Seiten der Lasten und auf Seiten der Widerstände, keinen differenzierten Niederschlag gefunden haben. Dies ist nicht nur zu bedauern, sondern nach Feststellung und Auswertung der hiermit vollständig dargestellten Bemessungsverfahren eine noch anstehende Aufgabe, will man Tragwerke aus FVK effizient bemessen.

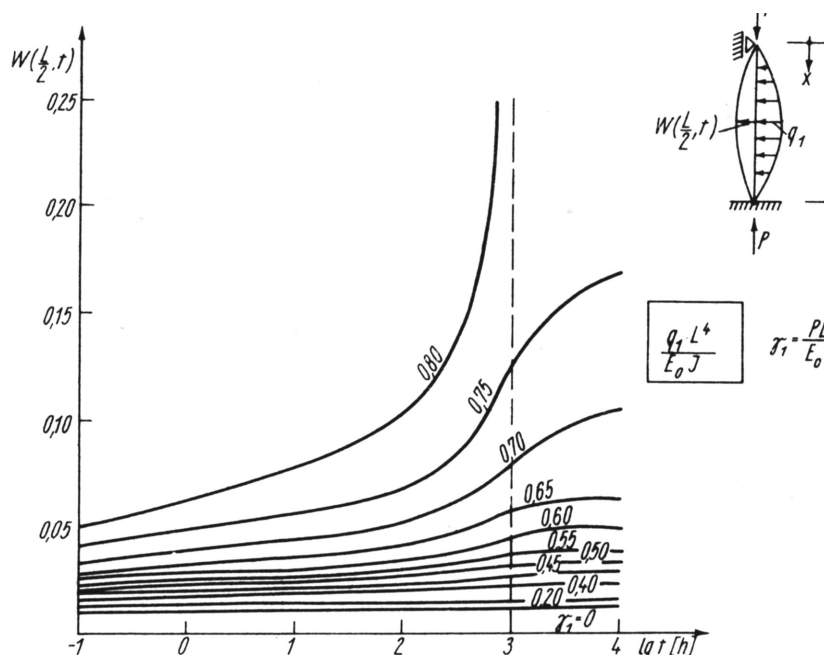


Abb. 159

Untersuchung der Stabilität eines gelenkig gelagerten Stabes unter Kriecheinfluss Ackermann (1972), 45

γ_1	t=0	t=1h	t=10h	t=50h	t=100h	t=250h	t=500h	t=1000h	t=10 000h
0	0,010266	0,010692	0,011046	0,011230	0,011389	0,011763	0,012159	0,012508	0,012670
0,20	0,012832	0,013504	0,014073	0,017374	0,014633	0,015251	0,015917	0,016522	0,016822
0,40	0,017110	0,018320	0,019385	0,019961	0,020459	0,021667	0,023011	0,024299	0,025022
0,45	0,018665	0,020112	0,021403	0,022109	0,022719	0,024209	0,025885	0,027527	0,028494
0,50	0,020532	0,022293	0,023891	0,024774	0,025540	0,027422	0,029571	0,031732	0,033086
0,55	0,022813	0,025003	0,027031	0,028169	0,029157	0,031610	0,034464	0,037430	0,039441
0,60	0,025665	0,028462	0,031120	0,032639	0,033964	0,037292	0,041259	0,045567	0,048819
0,65	0,029331	0,033028	0,036662	0,038793	0,040660	0,045428	0,051305	0,058079	0,064048
0,70	0,034220	0,039332	0,044595	0,047797	0,050620	0,058009	0,067563	0,079573	0,093086
0,75	0,041064	0,048592	0,056879	0,062213	0,066970	0,079899	0,097925	0,123910	0,170280
0,80	0,051330	0,063501	0,078390	0,088949	0,098578	0,12660	0,17130	0,25393	
Multiplikator: $q_1 L^4 / E_0 J$									

Abb. 160

Untersuchung der Stabilität eines gelenkig gelagerten Stabes unter Kriecheinfluss: Multiplikatoren Ackermann (1972), 44

Tabelle 1.3 Anpassungsfaktoren GUP

Gültig für alle Lamine aus UP-Harz (Buna) mit Matten- bzw. Gewebeverstärkung

Blatt 1: Anpassungsfaktoren $m_R(T)$ und $m_V(T)$ Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf Festigkeitsgrößen $m_R(T)$ und Verformungsgrößen $m_V(T)$

Temperatur T in °C	$m_R(T)$		$m_V(T)$	
	Zug Biegung	Druck	Zug	Druck Biegung
-20	1,05	1,05	1,05	1,05
0	1,05	1,05	1,05	1,05
20	1,00	1,00	1,00	1,00
40	0,71	0,59	0,77	0,77
60	0,57	0,37	0,63	0,54
65	0,54	0,32	0,60	0,49
80	0,43	0,20	0,50	0,35

Abb. 161

Anpassungsfaktoren nach Ackermann (1982), 16

Zusammenfassung:

Die Bemessungen der Theoretiker der frühen Jahre (Pionierzeit bis ca. 1970) unterscheiden sich grundsätzlich nicht von den Bemessungen der entwerfenden Pioniere. Die Theoretiker fassen die Ansätze der Entwerfer zusammen und unterstützen die sich zaghaft entwickelnden Regeln mit vielfachen Versuchen. Im Ergebnis dieser Versuche stehen die Bereitstellung von Kurzzeitkennwerten für gebräuchliche FVK sowie Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens. Besonders Menges und seine Mitarbeiter machen sich um die Bereitstellung solcher Kurzzeitkennwerte verdient. Für eine einfache Bemessung anhand überschläglicher Verfahren stehen ebenso die Gruppe um Menges als auch die Gruppe um Hintersdorf.

Nach Abklingen der Bautätigkeit und Überschreiten der Pionierphase nach 1972 äußern sich zunehmend auch die forschenden Bauingenieure zur Bemessung von Tragwerken aus FVK. Ihre Untersuchungen widmen sich vornehmlich der Abschätzung des temperatur- und zeitabhängigen Langzeitverhaltens der belasteten Kunststoffe. Dabei sind zwei neue Ansätze zu verzeichnen. Eine Gruppe von Wissenschaftlern vertritt die Ansicht, dass den Tragwerken aus FVK geringere Belastungen zugemutet werden können, als aus den damals gebräuchlichen DIN-Normen ersichtlich. Sowohl *Hilgenberg (1976)* als auch *Domke (1975)* unternehmen den Versuch, die anzusetzenden Lasten aus den über 10 Jahre gemittelten meteorologischen Daten diverser Standorte zu gewinnen. Tragwerke, die mit den so gewonnen Lasten und dem entsprechenden Lastkollektiv beansprucht werden, können um ein Vielfaches effektiver bemessen werden *Domke (52/1977)*. Eine Vergleichsrechnung für das bereits gebaute fg 2000 erbringt den Nachweis, dass die Konstruktion um das Doppelte überbemessen ist *Langlie (1978)*.

Ein anderer Ansatz ist das Erfassen des zeitabhängigen Verhaltens mit Hilfe mathematischer Modelle. Die von *Ackermann (1972)* und *Domke (1975)* unabhängig voneinander erstellten reologischen Modellvorstellungen haben zum Ziel, das Langzeitverhalten des FVK über einen Zeitraum von 12 bis 20 Jahren abzuschätzen, ohne dass die dafür erforderliche Echtzeit verbraucht werden muss. Somit können für verschiedene Lastkollektive und Temperaturen Datenmatrizen erstellt werden, die dem Konstrukteur eine effektive Bemessung des Tragwerks ermöglichen. Beide Forschungen werden erst Ende der 1970er bzw. Anfang der 1980er Jahre veröffentlicht, was dazu führte, dass sie für die Anwender uninteressant waren.

5.4 Einfluss der Lasteinwirkungen

„Am Eingang der Berechnung stehen die Lastannahmen. Die DIN 1055 stammt aus dem Jahre 1963, wo Kunststoffe zwar schon als Baustoffe bekannt waren, aber nicht als Konstruktionswerkstoffe. Wir finden dort wohl schon einige Gewichtsangaben von Kunststoffen, aber keine Lastannahmen für Kunststoffe. Für Kunststoffe sind aber im Gegensatz zu konventionellen Baustoffen die Wechselwirkungen zwischen Bauteil und Belastung entscheidend. Seit 2 Jahren sind Untersuchungen im Gange, ich nenne hier die Arbeiten von Domke*, die den Beweis erbringen wollen, daß dem Kunststoff generell geringere Belastungen aus den Komponenten Sonne, Wind und Schnee zugerechnet werden dürfen.“ *Schwabe (1977), 98*

Was Schwabe hier unter der Überschrift „Neues Denken bei den Lastannahmen“ zusammenfasst, ist bereits aus dem vorangegangenen Kapitel bekannt. Domke kümmert sich so eingehend um die Eingangsgrößen der Berechnung, dass an deren Ende ein befriedigendes Ergebnis steht. Es geht hier allerdings allein um die Problematik der Dauerlast bzw. um die Frage: Wie oft und in welcher Höhe greifen die veränderlichen Lasten (Wind und Schnee) an. Indem Domke die meteorologischen Daten, die über Jahre gesammelt wurden, mittelt und ansetzt, gibt er dem Material die Chance, sich zwischen den Lastgängen zu erholen und bekommt ein Ergebnis, das dem effektiven Tragverhalten sehr gut entspricht. Die Annahme der Höchstlasten erfolgt bei Domke wie bei allen anderen Autoren, durch die vorhandenen Normen. Dieser Teil der Lastannahmen stellt also zu keiner Zeit ein Problem dar. Eigengewichtslasten der FVK wurden entweder durch die Hersteller des Materials bereitgestellt bzw. konnten vom Entwerfer durch einfachen Versuch ermittelt werden. Sie spielen im Verhältnis zu den veränderlichen Lasten allerdings eine aufgrund ihrer Größenordnung untergeordnete Rolle.

Auch andere Autoren untersuchen die Möglichkeit veränderlicher Lastansätze. In einem Beitrag geht *Hilgenberg (1976)* auf die Windbelastung bei Baukonstruktionen aus FVK ein. Seine vorangestellte Bemerkung, „die tatsächlichen Windlasten sind selbstverständlich nicht von den Werkstoffeigenschaften abhängig, wohl aber die Windlastannahmen“, bestätigt die Arbeiten von Domke und gilt hier auch für die anderen Lastannahmen. Eine wirklichkeitsgetreue Beschreibung der Windlasten wäre für eine Bemessung viel zu kompliziert, ergo sind die Lasten, mit denen wir rechnen, eine Modellvorstellung. Diese weist jedoch Vereinfachungen auf, die für den Kunststoff ungeeignet sind. „Die Abhängigkeit der Windbelastung von der Zeit[...] wird in dem Berechnungsmodell überhaupt nicht berücksichtigt. Die Windgeschwindigkeit bzw. der Winddruck wird mit dem maximalen Wert als über die Zeit konstant wirkend angenommen“ *ebenda, 1*. Hilgenberg entwickelt in seiner Dissertation an der RWTH Aachen ein Windlast-Modell, was die Abfolge von Be- und Entlastung berücksichtigt *Hilgenberg (1974)*. Das Windbelastungsmodell ist in Abb. 162 dargestellt. Unter Auswertung und Ansatz gemittelter meteorologischer Daten bestimmt er für den Standort Aachen den Kriechlastanteil aus der Windbelastung und daraus einen Anteil ständig anzusetzender Windlast und einen Anteil Langzeitwindlast. Parallel zu Domke entwickelt Hilgenberg also ein vergleichbares Lastmodell. Seine Beispielrechnung ergibt eine um 33 % größere zulässige Spannung gegenüber dem herkömmlichen Lastmodell, wo Wind als ständige Dauerlast angesetzt wird.

In den heutigen Bemessungsempfehlungen sind solche Lastannahmen in Abhängigkeit von der Zeit nicht enthalten.

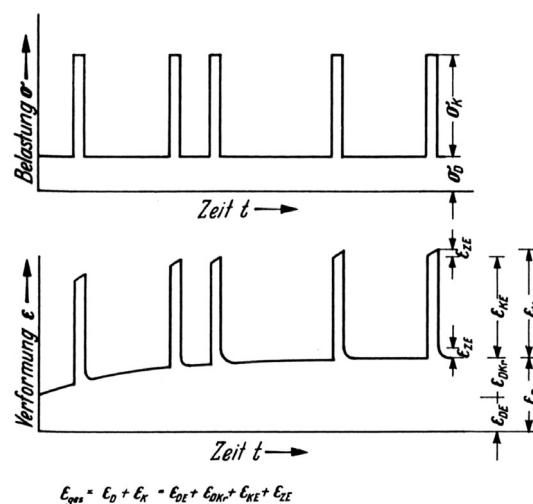


Abb. 167
vorgeschlagenes
Windbelastungsmodell
für Tragwerke aus FVK
nach Hilgenberg (1976), 3

5.5 Die Normen

1. 1950-1980

Die Entwicklung der Normen für das Bemessen und Konstruieren für Tragwerke aus faserverstärkten Kunststoffen kann exemplarisch am Beispiel von Deutschland nachvollzogen werden.

Sicher ist, dass die ersten Pioniere des tragenden Kunststoffbaus Ende der 1950er bis Anfang der 60er Jahre ohne Richtlinien und Normenwerk auskommen mussten. Es gab weder Stoffnormen, noch Prüfnormen oder Bemessungsnormen für FVK. Am schnellsten änderte sich dieser Zustand für die Stoff- und die Prüfnormen. In *Saechling (1973)*, 568 ist zu lesen „Die meisten bestehenden Normen auf dem Kunststoffsektor sind Normen für die Prüfung von Kunststoffen und daraus hergestellten Erzeugnissen [...] z.B. für die Prüfung der mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften, der Brennbarkeit und der Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse [...]“.

Gerhard Dieterich benennt in der ersten Berechnung für das Bausystem fg 2000, erstellt vor 1968 „die vorläufige Richtlinie für glasfaserverstärktes Polyesterharz“. Im Juli 1972 erscheinen die „vorläufigen Richtlinien zur Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung von Bauteilen aus GFK“ vom Institut für Bautechnik, Berlin.

Bemessungsnormen sind noch nicht vorhanden. Das Institut für Bautechnik entscheidet im Einzelfall über die Richtigkeit der Bemessung der Tragwerke und gibt die Sicherheiten an, mit denen die Kurzzeitfestigkeiten abzumindern sind.

Hier ist die Bauaufsicht nicht sehr mutig, wie *Schwabe (1977)*, 98 feststellt: „Für die Dimensionierung gilt wie für alle Baustoffe der gleiche Sicherheitsfaktor = 1,7 - 2. Davor hat aber die Bauaufsicht für die Unbekannten der Kunststoffe als Hilfsgerüst die 4 Siebe der Abminderungsfaktoren aufgebaut, die in der Endsumme bis zum Faktor 2 gehen und da $2 \times 2 = 4$ ist, die Dimensionierung verdoppeln und damit die Wirtschaftlichkeit halbieren können.“

Hier muss gesagt werden, dass die Erhöhung und die Unwirtschaftlichkeit eigentlich viel größer ist, denn allein ein Abminderungsfaktor, nämlich derjenige, der das Verhalten unter Dauerlast abbildet, kann bereits 2 sein, die anderen Werte können zwischen 1,2 und 1,8 liegen, sodass die gesamte Abminderung auf $2 \times 3,0 = 6$ anwachsen kann, was auch als ein von den Ingenieuren gebräuchlicher Wert angesehen wurde. Um Abhilfe zu schaffen, wendet sich Schwabe an die Industrie und empfiehlt:

„Ich sprach [...] vom Problem mit den Abminderungsfaktoren. In den dort oberen Instanzen der Bauaufsicht, dort wo die Vorschriften gemacht werden, da sitzen ja heute zum Teil sehr kunststoffkundige Fachleute, die auch zu Gesprächen offen sind. Diese werden sich sicher nicht sträuben, wenn ihnen die Kunststoffindustrie beweisen kann, daß diese Abminderungsfaktoren zu hoch, ja daß sie teilweise überflüssig und z.B. durch Güteklassen zu ersetzen sind.“ *Schwabe (1977)*, 101

Die Sortierung von Produkten nach Güteklassen, wie es beispielsweise im Holzbau üblich ist, wäre eine nötige Aufgabe der Produkthersteller gewesen, um die Anwendung von FVK im Bauwesen zu erleichtern und zu fördern.

2. Die Übergangszeit 1980 bis 1995

1986 wurde die DIN 18820 „Textilglasverstärkte ungesättigte Polyesterharze für tragende Bauteile“ mit folgenden Teilen eingeführt

DIN 18820 Teil 1: Aufbau, Herstellung und Bemessung

DIN 18820 Teil 2: Aufbau, Physikalische Kennwerte

DIN 18820 Teil 3: Schutzmaßnahmen für das tragende Laminat

DIN 18820 Teil 4: Prüfungen und Überwachung

Im Teil 1 Bemessung ist folgender Bemessungsalgorithmus angegeben:

Festigkeit:

$$R = \frac{R_0}{k_t \times k_\vartheta \times k_u}$$

R_0	Kurzzeitfestigkeit
k_t	Faktor für Belastungsdauer
k_ϑ	Faktor für Temperaturbeanspruchung
k_u	Faktor für Umgebungsmedien

Verformung:

$$\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} = \left[\frac{\sigma_I}{E_0} (1 + \varphi_t \times c_\vartheta \times c_u) \right] + \left[\frac{\sigma_{II}}{E_0} \times c_\vartheta \times c_u \right]$$

E_0	Kurzzeit-E-Modul
φ_t	Kriechfaktor
c_ϑ	Faktor für Temperaturbeanspruchung
c_u	Faktor für Umgebungsmedien

Hier ist offensichtlich, dass das genormte Verfahren nicht das Verfahren mit Abminderungsfaktoren ist, aber auch nicht das Verfahren nach Domke abbildet. Man erhält allerdings ähnlich günstige Werte wie beim Domke-Verfahren. Diese Norm bestand bis 1991 und wurde durch die neue DIN 18820 abgelöst: „Lamine aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile (GF-UP, GF-PHA)“ mit den Teilen: Aufbau, Herstellung und Eigenschaften, Physikalische Kennwerte der Regellamine, Schutzmaßnahmen für das tragende Laminat, Prüfung und Güteüberwachung.

3. heute (2005)

Für die Bemessung von Tragwerken aus Kunststoffen stehen heute in Deutschland folgende Normen zur Verfügung:

VDI 2014 Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund

Blatt 1: Grundlagen

Blatt 2: Konzeption und Gestaltung

Blatt 3: Berechnung

Blatt 4: Zuverlässigkeit und Sicherheit

1988 erscheint der erste Teil der VDI 2014. 1997 erscheint Teil 3, der die Berechnung als Entwurf regelt. Der Berechnungsteil setzt die Bemessung nach der Netz- oder Laminattheorie voraus. Entsprechend werden Computer-Programme, die mit diesen Theorien arbeiten, empfohlen und gewertet.

Die für den Bauingenieur wichtigen Abschätzungen des Kriechanteils unter Last und Temperatur werden im Teil 3 nicht behandelt, sie sind dem Teil 4 vorbehalten, der allerdings nur im Rohentwurf vorliegt.

Die DIN 18820 besteht weiterhin. Die Bemessung erfolgt nach dem Konzept der zulässigen Spannungen, also mit globalem Sicherheitsfaktor. Da im Bauwesen mittlerweile alle Werkstoffe außer die FVK nach der Methode der Grenzzustände mit differenzierten Sicherheitsfaktoren bemessen werden, bestand die dringende Notwendigkeit einer neuen Bemessungsrichtlinie. Sie ist mit den „BÜV-Empfehlungen für tragende Kunststoffteile im Bauwesen [TKB]“ entstanden. Der aktuelle Entwurf in der Fassung vom Oktober 2002 wird in absehbarer Zeit nicht in eine gültige Normvorschrift überführt werden, da es die dafür nötigen Gremien, wie sie beispielsweise im Beton- und Stahlbau existieren, für den FVK-Bau nicht gibt.

Prinzipiell sind sowohl die Seite der Einwirkungen als auch die Seite der Widerstände temperatur-, zeit- und medienabhängig. Das Bemessungskonzept der BÜV-Empfehlungen sieht auf der Seite der Einwirkungen eine Zeitabhängigkeit vor, auf der Seite der Widerstände nicht. Die materialabhängigen Widerstände der Kurzzeitproben werden mit Abminderungsfaktoren für Dauerlast A1, Medieneinfluss A2 und Temperatureinfluss A3 belegt. Diese Faktoren wurden aus Kriechversuchen mit dauernder Last über 20 Jahre ermittelt, für Schnee wurde dabei z.B. ein Lastkollektiv von 3 Monaten berücksichtigt. Auf die Standortabhängigkeit der Teilsicherheitsfaktoren wird hingewiesen, zahlenmäßige Empfehlungen fehlen aber.

6. Bilanz

Die Verwendung von FVK für Tragwerke beginnt Mitte der 1950er Jahre. Sie wird durch drei Faktoren angeregt: Die beiden wichtigsten sind die Suche der Industrien nach neuen Märkten und die Suche der Flugzeugbauer nach neuen Anwendungsgebieten für Leichtbaustrukturen. Beide Faktoren beruhen auf dem gleichen Umstand, der Beendigung des 2. Weltkrieges und der damit einhergehenden Umstrukturierung von Wirtschaft und Forschung. Die chemischen Industrien stellen zwischen 1950 und 1970 in ausreichendem Umfang Forschungsgelder zur Verfügung, um FVK in Tragstrukturen für Hochbauten zu untersuchen. Gleichmaßen stellen die Flugzeugingenieure ihr Wissen über den FVK und dessen Anwendung in Leichtbaukonstruktionen in den Dienst der Bauindustrie. Von diesen beiden Säulen gehen die Entwicklungen im Bauwesen aus.

Die dritte Säule basiert auf den Intentionen und Entdeckungen einzelner Architekten und Ingenieure. Auf der Suche nach neuen Strukturformen entdecken sie den FVK für leichte und transparente Tragwerke. Zwei Namen stehen für die Einführung des neuen Werkstoffes – Buckminster Fuller und Heinz Isler. Auf der Suche nach geeigneter Materialisierung eines Tragwerks finden weitere Forscher-Ingenieure zum FVK. Heinz Hossdorf, Renzo Piano und Z.S. Makowski eint ein unvoreingenommener Forscherdrang und die Lust am Experimentieren sowie die Möglichkeit der Bereitstellung eigener finanzieller Mittel zur Realisierung eines neuen Tragwerks. Alle Forscher-Ingenieure gewannen ihr Wissen über den verstärkten Kunststoff aus der Arbeit mit GFK als Modellbaumaterial. Neben den Bauten, die durch die Chemieindustrie initiiert wurden, sind es die Bauten der Forscher-Ingenieure, die die Einführung des FVK für Tragwerke maßgeblich befördern.

Bereits Mitte der 1960er Jahre verringern sich die Aktivitäten der chemischen Industrien für Tragwerke aus FVK deutlich. Weiterhin unterstützen sie die Entwicklung, treten aber als Bauherren in den Hintergrund. Eine andere Personengruppe steht nun für neue Konzepte: Die privaten Bauherren. Durch die Vereinigung von Bauherr, Investor, Architekt und Ingenieur in einer Person gelingen unkonventionelle Bauten. Neue Wohnformen mit großzügigen Grundrissen und ungewöhnlichen Außenhüllen werden gebaut. Das mobile Bauen wird entscheidend befördert. Mobiles Bauen und FVK verschmelzen zwischen 1960 und 1970 zur untrennbaren Einheit.

Mit dem mobilen Bauen rückt die Frage der Herstellung und des Transports der Tragwerke in den Vordergrund. Während zwischen 1950 und 1960 beim Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen in der Tragstruktur bereits bekannte Tragwerke verwendet werden (die linearen Tragwerke sind aus dem Stahl- und Holzbau, die Flächentragwerke aus dem Betonbau bekannt), entstehen aus den Erfordernissen des mobilen Bauens neue Tragwerke. Die Tragwerke müssen vorgefertigt und aus Gründen des Transports sowie der Kostenrelevanz geteilt werden. Aus dieser Notwendigkeit entwickeln sich zwei Lösungsansätze. Der erste Lösungsansatz, das Zerschneiden der aus dem Betonbau bekannten Flächentragwerke, verändert lediglich das Tragverhalten negativ infolge der häufigen Störungen. Der zweite Ansatz ist jedoch eine Weiterentwicklung und führt zu Tragwerken mit neuer Tragqualität. Aus kleinen ungeteilten Kunststoff-Elementen wird durch Hinzufügen von Elementen aus anderen Materialien eine Großstruktur gebildet. Die so erstellten Tragwerke verbinden die Vorzüge der unterschiedlichen Materialien und mildern ihre Nachteile. Besonders Z.S. Makowski, Renzo Piano und Pieter Huybers widmen sich diesem Tragwerkstyp, den sie Raumgitter-Flächentragwerke nennen und der eine Mischung aus Faltelementen und Stäben darstellt. Zwar nennen sie ihre zusammengesetzten Konstruktionen nicht „hybride Tragwerke“, doch sie sind bereits Konstrukteure und Anwender dieses Tragwerkstyps, lange bevor Jörg Schlaich diesen zusammengesetzten Tragwerkstyp begrifflich fasst und seine außerordentliche Leistungsfähigkeit theoretisch und praktisch nachweist. Makowskis und Huybers ganzheitlicher Ansatz umfasst auch die Erarbeitung von Bemessungsvorschriften für solche Raumgitter-Flächentragwerke, mit denen die Spannungsverteilung exakt bestimmt werden kann.

Die Bemessung der Tragwerke orientiert sich zu Beginn an Nachweisen tradierter Materialien. Dabei zeigt sich das Problem, das Langzeitverhalten der FVK unter Last und Temperatur richtig abzuschätzen. Die entwerfenden Ingenieure vertrauen dabei stets auf den Versuch und nicht auf die Berechnung. Dies liegt vornehmlich an den noch nicht zur Verfügung stehenden Rechenalgorithmen für Tragwerke aus FVK. Ihre Versuche haben einen konkreten Einfluss auf die Konstruktion und die Tragwerksform: Die Stabilitätsproblematik der dünnen Flächentragwerke sowie des Festigkeitsverlustes über die Lebensdauer können nur durch doppelt gekrümmte Tragwerke oder durch Stützkernkonstruktionen ausgeglichen werden. Das typische Kunststoffhaus besteht aus einer Stützkernkonstruktion, die neben der Tragfunktion auch weitere schützende

und raumabschließende Funktionen übernimmt. Mit der Stützkernkonstruktion ergibt sich erstmals die Möglichkeit, alle Schutzfunktionen in dem tragenden Bauteil zu vereinen. Was für den Flugzeugbau Notwendigkeit ist, wird nun für den Bau von Häusern umfassend genutzt.

Von den entwerfenden Ingenieuren angeregt, widmen sich einige Theoretiker ausschließlich der Bemessung von Tragwerken aus FVK. Ihre Arbeiten haben keinen Einfluss auf die Konstruktion der Tragwerke und kaum noch auf deren Bemessung. Sie präsentieren ihre Ergebnisse zu einer Zeit, als das Bauen mit FVK in der Tragstruktur bereits deutlich abgeklungen ist. Ihre Erkenntnisse sind jedoch von grundlegender Wichtigkeit für ein effizientes Bemessen. Die erste Erkenntnis betrifft den Ansatz der Lasten auf die Tragwerke. Sowohl Hilgenberg als auch Domke weisen nach, dass bei richtiger Einschätzung der Dauer der einwirkenden Hauptlasten Wind und Schnee eine Bemessung zu verantworten ist, die um die Hälfte günstiger abschließt als mit Verfahren, die auf Normlasten beruhen. Die zweite Erkenntnis betrifft die richtige Abschätzung der Verluste infolge Dauerlast und Temperatur über die Lebensdauer. Hier entwickeln Ackermann, Menges und Domke reologische Modellvorstellungen, mit denen eine Abschätzung der Kriechkurve für Langzeit unter Einsparung der realen Versuchszeit genügend genau gelingt. Die von Ackermann aufgezeigten Ergebnisse sind zudem nicht nur für dauernde Belastung anwendbar, sondern auch für kurze Lastwechsel.

Das Bauen mit FVK in der Tragstruktur findet ein abruptes Ende infolge der Ölkrise 1973. Neben diesem wirtschaftlichen Hintergrund haben weitere Gründe bereits vor 1973 zum Abklingen des Bauens mit Kunststoffen geführt. Sie gehen in zwei Fällen von den ursprünglichen Initiatoren aus. Die Chemische Industrie zog sich sukzessive vom Baumarkt und der Entwicklung von Tragwerken aus FVK zurück. Hauptgrund war die Unwirtschaftlichkeit der Bauten. Form und Funktion der in Großserienfertigung geplanten Bauten wurden nur von einem geringen Teil der Bevölkerung angenommen. In den meisten Fällen wurden entsprechend nur unrentable Prototypen oder Kleinserien produziert. Weiterhin war es den Produktherstellern während zweier Dekaden nicht möglich, ihre Produkte in einer überschaubaren Form darzustellen. Die unendliche Vielfalt der Mischungen aus Fasern und Harz hätte einer Einordnung in Güteklassen, wie sie aus dem Holzbau bekannt sind, bedurft. Nicht unwesentlich für das Abklingen der Konjunktur ist auch die Tatsache, dass es nach 1973 außer Amtor Schwabe keine Integrationsfigur gab, die sich dem Material FVK und dessen Verbreitung gewidmet hat. Es fehlten die Pioniere, denen es gelingt, den Werkstoff am Rande der Massenbaustoffe Beton und Stahl am Baumarkt zu etablieren.

7. Ausblick

1977 gibt Baurat Amtor Schwabe in der Zeitschrift *plasticconstruction* einen umfassenden Überblick über die Probleme und die ungelösten Aufgaben im Zusammenhang mit der kontinuierlichen Weiterverbreitung von GFK im Bauwesen. Er überschreibt seinen Artikel mit „Wie lassen sich die Hemmschuhe für GFK im Bauwesen beseitigen?“

„Der Bericht behandelt folgende Vorschläge:

- Den Baumarkt systematisch nach geforderten Eigenschaften, Abmessungen, Produktionsstückzahlen durchleuchten
- Den konstruktiven Umgang mit GFK auch für einen breiten Kreis von Nicht-Spezialisten bei Architekten und Ingenieuren verständlich machen
- Der Berechnung von Kunststoffkonstruktionen angepaßte und sinnvolle Lastannahmen zugrunde zu legen
- Der Bauaufsicht vom Hersteller und Verarbeiter ein standardisiertes Material anzubieten, dessen Eigenschaften allgemein anerkannt und gewährleistet sind
- Ein Ende machen mit der Zersplitterung um Handelsnamen und differenzierte Produkteigenschaften
- Das Brandrisiko real einschätzen bzw. berechnen
- Die bestehenden Produktionsverfahren auf die Möglichkeit der wirtschaftlichen Herstellung größerer Teile untersuchen und weiterentwickeln“ *Schwabe (1977), 97*






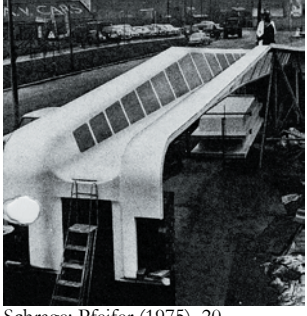
Die vorliegende Arbeit hatte sich zum Ziel gesetzt, einige dieser „Hemmschuhe“ unter heutigen Gesichtspunkten noch einmal genau zu beleuchten und Vorschläge zu erarbeiten, mit denen eine Verwendung von FVK für Tragstrukturen im Bauwesen wieder befördert wird. Im einzelnen können folgende Schlussfolgerungen genannt werden:


Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum konstruktiven Umgang mit GFK und macht ihn für einen breiten Kreis von Nicht-Spezialisten verständlicher. Dies wird besonders durch die Spannweitentabelle unter Kapitel 4 unterstützt, die einen repräsentativen Überblick über die Leistungsfähigkeit der realisierten Tragwerke aus FVK darstellt. Mit der Tabelle ist eine erste Abschätzung über Eignung von Tragwerken aus FVK für gestellte Bauaufgaben möglich.

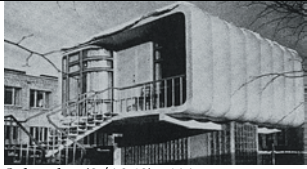





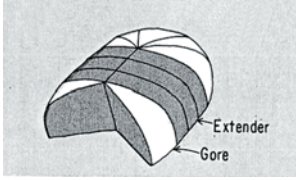

Im Kapitel 5 wurde an die Erkenntnisse zu sinnvollen Lastannahmen für Tragwerke aus FVK erinnert. Im Zuge der Gegenüberstellung verschiedener Lastansätze kann in Auswertung dieser Arbeit nur eine Forderung stehen: Der Ansatz von Normlasten ist ineffizient. Die Lasten sind standortabhängig festzulegen, entsprechende Daten sind beim meteorologischen Amt zu beziehen. In Anbetracht der gravierenden Einsparungen ist diese Vorgehensweise beim Lastansatz zu empfehlen, unabhängig davon, in welches Bemessungsverfahren sie eingehen.


4.2.1 Lineare Tragwerke



4.2.1.1 Biegeträger




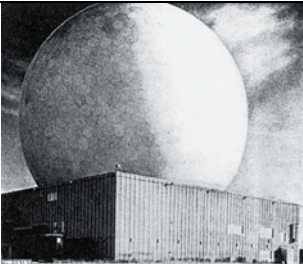

Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing/Herstellung	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1956	 Ganz-Plastik-Haus (1957), 57 Schein (1959), 236	Französisches Schneckenhaus , Frankreich für Exposition des Arts Menagers in Paris (Salon der Haushaltskünste), Arch: Ionel Schein Ing: Y. Magnat Herst: hauptsächlich Fa. R. Camus Cie., beteiligt an Bau und Ausstattung: Charbonnages de France und Houillères du Nord	Sandwich aus Wabenplatten und GUP Deckschichten $t = 40$ mm und GFK-Trägern; Achtelkreis-Elemente bei Durchmesser 10 m: Platten mit 8 tragenden Stegen , ein Auflager bildet die Mittelstütze, eines der gekrümmte Randträger Tragwerk Träger:	radiale Einfeldträger mit Kragarm: Feld: 5,0 -8,0 m Kragarm: 1,50 m Randträger gekrümmt: (Achtelkreis: $l = 4$ m	
1961	 Hintersdorf (1962), 34 und 201 Badstube (1964), 330	Parkgarage Entw.: M. Badstube (Berlin Ost) in Stützkernbauweise mit GUP- Deckschichten und Papierwabenkern einseitig eingespannte Segmente á 1m Breite, Stützkern: Papierwabe harzimprägniert PKA 25/19, Wabendicke veränderlich von 300 mm bis 40 mm; Segmentmasse: 24 kg/m ² , davon Stützkernbauteil 13,5 kg/m ²	gekrümmter eingespannter Biegebalken, mit Fuß an eine Stahlröhre angeschlossen, Konstruktion Biegemomentverlauf angepasst; Deckschichten am Fuß 3,5 mm zum Ende verringert: bis 0,5 mm und im Zugbereich von 7 mm auf 1 mm im Druckbereich;	$L_{\text{krag}} = 6,74$ m	$g = 0,135$ $s = 0,57$ $w = 0,50$ und Zusatz- wind $w = 0,10$
1968	 Langlie (1973a), Langlie (1973b), Feierbach (1979), Feierbach (1973a), Feierbach (1973b)	fg 2000 , BRD Bausystem für EFH Arch. und Herst.: W. Feierbach Ing.: G. Dietrich / C. Langlie aus Wand- und Dachelementen zusammengesetzt räumliche Elemente	Platten $b = 1,25$ m mit tragenden Stegen; Decken- und Wandelemente bilden zus. einen Rahmen	Rahmen: $l_{\text{Stiele}} / l_{\text{Riegel}} =$ 2,95/ 10,55 trag. Steg $b/d =$ 10/ 40 mm; mitttragende Platte $t = 6$ mm	$g = 0,52/$ $p = 0,75$ (Schnee) $q = 1,27$
1972	 Langlie (1973a), Langlie (1973b), Feierbach (1979), Feierbach (1973a), Feierbach (1973b)	Weiterentwicklung fg 2000 Entwicklung: Wolfgang Feierbach Herstellung: Bayer AG, Gevetex Textilglas-GmbH, Chemische Werke Hüls AG Ing.: C. Langlie Positive und negative Eckelemente	Tragwerk wie fg 2000 (1968)	wie fg 2000	wie fg 2000
1973 01	 Saechtling (1973), 490	Fußgängerbrücke , GB Gelände der English Electric in Liverpool Verbindung Bürohaus mit Betriebsgebäuden	Röhre, vollständig aus GFK Fußboden, Ober- und Untergurte: U-Profil (verstärktes "eXtren"- Material) Dachteile im Kontaktverfahren geformt	Durchl.träger $l = 8-9$ m	
1973 02	 Schrage; Pfeifer (1975), 20	Morpeth-Secondary School , GB, London Arch.: Nachshen Crofts & Leggatt Consulting Engineers Herst.: Anmac Ltd. Nottingham Schulkomplex mit GFK- Dachelementen überdeckt,	Binder als Z-Träger, Sandwich mit PUR-Kern	Einfeldträger $l = 18,0$ m Spannweite bei Konstruktions höhe max. 2,50 m und Breite von 2,50 m	

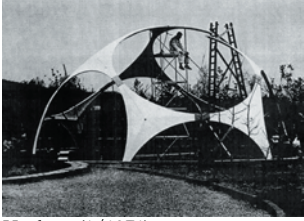
1974	 <p>- technique & Architecture (Einzelseiten im Jahrgang 1974 eingeordnet)</p>	Spindeltreppe	radiale Kragträger mit angesetzten Pfosten (h= 1,0 m) Trägerhöhe an Einspannung: 120 mm	Kragträger l = 1,20 m	p = 3,5 kN/m ²


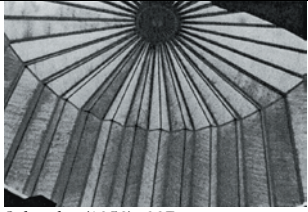




4.2.1.2 Rahmen, Bogen					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1962	 Schwabe (8/1969), 411	Leningrad Haus , SU von Lenprojekt, Leningrad eimm. Ausführung, 45 m ² , GFK – Schaum – GFK, Fenster aus PMMA	einachsig gekrümmte Rahmenelemente	L = 8 m geschätzt	
1964	 Kunststoffe (Heft 2/1964), 128	freitragendes Gewächshaus , BRD Herst.: BASF zusammengesetzt aus Schalen 7 x 0,66 m, t = 0,8-3,2 mm Hallengröße: LxBxH 30 m x 9 m x 4 m, Gesamtgewicht 1 t innerhalb 4 Tagen aufstellbar Lichtdurchlässigkeit 82%	System annähernd ein Dreigelenkrahn mit Rahmenbreite 9 m, Rahmenhöhe 4 m	l Rahmen = 9 m	g = 0,05 – 0,06 Windlast 50 kp/m ² w = 0,50
1965	 IBK (1973), 68/22	Fokker Haus Arch/Ing. Van Emden, NL mit räumlichen Elementen, GFK – Schaum – GFK	in IBK (1973) als Rahmen- und Segmentkonstruktion geführt, in IBK (1973) Übersicht als Stahlskelett mit räumlich geformten Sandwichplatten		
1968 01	 Langlie (1973a), Langlie (1973b), Feierbach (1979), Feierbach (1973a), Feierbach (1973b)	fg 2000 , BRD Bausystem für EFH Arch. und Herst.: W. Feierbach Ing.: G. Dietrich / C. Langlie aus Wand- und Dachelementen zusammengesetzt räumliche Elemente	Platten b=1,25 m mit tragenden Stegen; Decken- und Wandelemente bilden zus. einen Rahmen	Rahmen: l Stiele / l Riegel = 2,95/ 10,55 trag. Steg b/d = 10/ 40 mm; mitttragende Platte b=1,25 m, t=6 mm	g = 0,52/ s = 0,75 q = 1,27
1968 02	 IBK (1973), 68/22	Philips Meßhalle , NL Schutzhalle für Antennen und Meßgeräte, Herst. Mulder & Rijke (Schiffsbau), Ljmuiden, NL eimm. Ausführung, 100 m ² ,	Schalen- Rahmenkonstruktion aus räumlichen Elementen, GFK	L = 6,0 m, H = 4,50 m, b = 1,20 m	
1970	 The all-plastics (1970), 65 IBK (1973), 1970/03	Arch Domes , Ferienhäuser für die USA und Alaska Herst. Arch Domes Inc., Los Altos, Kalifornien Grundeinheit mit 7 Elementen (gore), erweiterbar (extenders) GFK – PUR-Schaum – GFK	Mittelteile sind Bogenelemente Randteile sind Schalelemente sh. 4.3.2.1_1970/02 	r = 4,65 m h = 3,35 m	
1972 01	 Langlie (1973a), Langlie (1973b), Feierbach (1979), Feierbach (1973a), Feierbach (1973b)	Weiterentwicklung fg 2000 Entwicklung: Wolfgang Feierbach Herstellung: Bayer AG, Gevetex Textilglas-GmbH, Chemische Werke Hüls AG Ing.: C. Langlie Positive und negative ECKEelemente	wie fg 2000	wie fg 2000	wie fg 2000




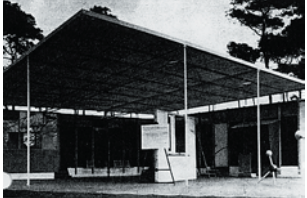
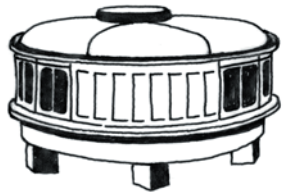


<p>1972 02</p>	 <p>Gemini Bungalow, NL Herst. Le Comte-Holland N.V., Vianen, NL Entwurf und Prototyp stammt von Concept International Enterprises Ltd., Canada von 1964 Schale, Grundrißvarianten 90 m² GFK – PUR-Schaum – GFK, t = 5 + 80 + 5 = 90 mm hölzerne Randversteifung der Schalen Musterhaus der Firma Suhrborg & Co. GmbH (1972) in Wesel-Bislich</p>	<p>Berechnung aufgrund geringer Krümmung der Mittelfläche nicht als Schale , sondern als Dreigelenkbogen ,mit einer dazwischenliegenden Platte, prinzipiell sind Seitenteile doppelt krumme Schalen</p>	<p>„Seitenteile“ = Dreigelenk- rahmen $l_{\max} = 4,70\text{m}$, $h_{\max} = 3,67\text{m}$</p> <p>„Mittelteile“ = Platte $l_{\max} = 7,00\text{m}$</p>	<p>$g = 0,22$ $s = 0,75$ $q = 0,97$</p>
<p>IBK (1973), 1972/03 Langlie (1976), 125 ausführliche stat. Berechnung</p>				

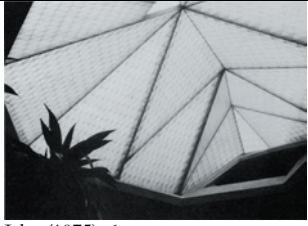
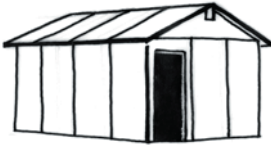

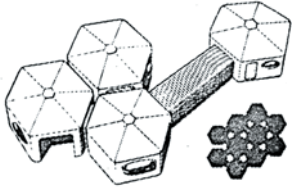


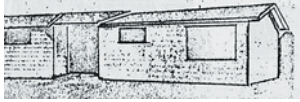
4.2.1.3 Stützen					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m²]
1969		Rondo , Wochenendhaus Arch.: Casoni & Casoni, Basel Ing.: René Walther, Basel Herst.: Horlacher AG, 7,8 m Durchmesser; h außen= 3,8 m, h innen= 3,2 m 50 m², Schalenkonstruktion, Gesamtkörper GFK – PUR-Schaum – GFK, Stahlskelett im Boden, auf Stahlstützen stehend Als komplette Einheit auf Fundamentsäulen gesetzt, Gewicht ca. 4500 kg	Stiele neben Fenstern (siehe Auszüge aus Statik) Ersatzquerschn. b/d= 30/7 cm h= 2,0 m	h= 2 m	Q = 30 kN
	Vorstatik Rondo (ca. 1972)				
1970		Futura , NL Ferienhütte Herst. NKI, Chaam Standort: Belgien und NL Küste 45 m², 3,30 m hoch, für 4-6 Personen, mehrm. Ausführung (einige 100), Schalenkonstruktion, Halbkugel GFK – PUR-Schaum – GFK, 3,5 mm – 40 mm – 3,5 mm	Stiele neben Fenstern		
	IBK (1973), 1970/13				

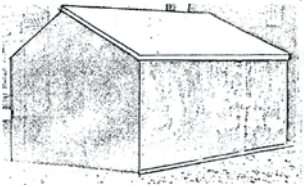

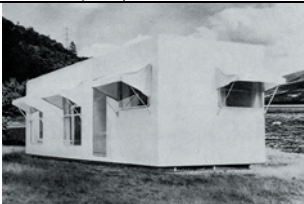
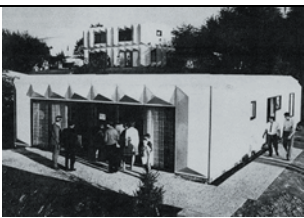
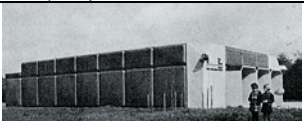
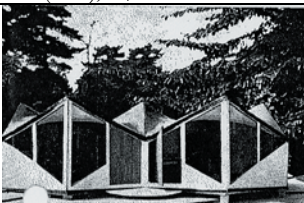
4.2.1.4 Stabwerkskuppel, Stabnetzkuipeln, geodätische Kuppeln					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung $g/p/q$ [kN/m ²]
1954 01	 www.radome.net Dietz (1955), 90	Radom, USA aus dreieckigen GUP-Platten, ca. 11 m Durchmesser , mattenverstärkte Flächen mit gewebeverstärkten Flanschen, transluzent	Platten und Stege gemeinsam als Tragstruktur	als Sandwich: $l = d_{\max} =$ 11 m	geringes g als Sandwich ca. 0,50 volle Wind, Schnee- und Eislast auch für arktische Gebiete
1954 02	 Tomorrow's Barn (1955), 93	Kuhstall als geodätische Struktur mit Holztragwerk, Quebec Arch.: Jeffrey Lindsay and Ass., Montreal, Direktor der Canadian Div. der Fuller Research Found. Herst.: Polyfiber Ltd., Renfrew, Ontario 25,5 m Durchmesser, 9,90 m Höhe	Stäbe als Tragstruktur hier Holzstäbe; Nebentragwerk: Platten FVK 76 dreieckige transluzente GFK- Platten über einem Phenol- getränktem Holzrahmen	Dreiecks- platten Kantenlänge $l = 2,0$ m	
1955 01	 Biggest Thing (1955), 98	2 Geodätische Strukturen, USA vollständig aus GFK als transportable Schutzhütte für Militär entwickelt gebaut von Geodesic Inc. ein weiteres gebaut von Universal Molded Products Corp., Bristol, Va. Hersteller: Lunn Laminates, Inc. Durchmesser 16,8 m , Höhe 11,70 m, insg. 6 t aus 361 Einzelteilen, 3 verschd. Formen herstellbar, faserverst. Platten auf dreidimensionalen Stahl- Trägerrost	Stäbe als Tragstruktur hier Stahlstäbe und -kreise; Nebentragwerk: Platten FVK 76 dreieckige transluzente GFK- Platten über einem Phenol- getränktem Holzrahmen	Dreiecks- platten Kantenlänge $l = 2,0$ m	
1955 02		Radom, USA auf Mt. Washington in New Hampshire, für Fernseh-Relaisstation gepresst, GFK-Platten aus hochfestem Glasgewebe mit Polyesterharz			
1960	 Bau einer großen Radarkuppel (1960), 651	Goodyear Aircraft Corp. 42 m Durchmesser	vornehmlich Platten als Tragstruktur Plattenelemente entwickelt aus Projektion eines Dodekaeder (12- Flächner) (Sechs- und Fünfecke) gewölbte Flächen mit Flächenradius 21m es handelt sich demnach um eine Kugelschale	$D = 42$ m Elemente $l =$ 1,80 m	$g_{\text{platte}} =$ 0,20 $w = 83$ m/s !!! $q_w = 4,3$!! $\Delta T = +/-$ 70 K
1967	 Dietz (1967), 307	Haystack Hill Radarkuppel Dreieckige GUP-Platten, in Tyngsboro, Mass./USA, Durchmesser: 45,5 m, Plattendicke 0,8 mm + 0,2 mm oder Radom 18 m Durchmesser Lincoln Laboratories Metalltragwerk mit GFK-Platten Vorgefertigte Bauteile vor Ort miteinander verbunden	Stäbe als Tragstruktur hier Stahlstäbe Nebentragwerk: Platten FVK Platten $t = 1,5$ mm		

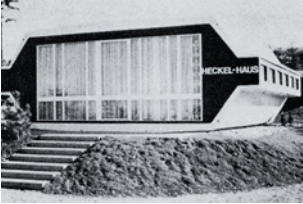
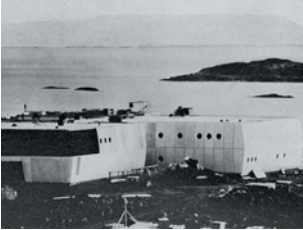


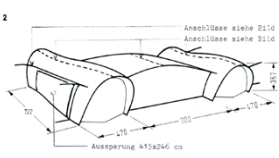

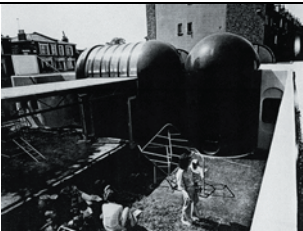
1970	 Huybers (1/1971)	Kuppeltragwerk, NL Schutzdach für Kinderspielplatz in Amsterdam Entwurf: Group Ludic, Paris Ing.: Stevin-Laboratorium, Uni Delft, NL regelmäßiger Dodekaeder auf Kugel (10 m Durchmesser) projiziert Gerüst aus 30 sichelförmigen Elementen bildet Gesamtform, drei fünfeckige Segeltuchmembrane wurden an Knotenpunkten des Dodekaeders aufgehängt	Dodekaeder als Stabstruktur	D = 10 m	
Zusammenfassung					
1955-2005	Dietz (1967), 307		Standard Dom trägt ein aus Dreiecken gebildets Netzwerk aus Rippen 1-2 cm breit und 8-10 cm hoch sowie einer 1,5 mm dicken GFK-Haut.	18 m Durchmesser	
1955-2005	www.radome.net		Platten und Stege gemeinsam als Tragstruktur	als Sandwich: $l = d_{\max} = 35 \text{ m}$	
1955-2005	www.radome.net Krausse (1999),		Stäbe als Tragstruktur Größere Radome bis 50 m: aus Rippen (Stäben) aus Metall und GFK-Platten Nebentragwerk: Platten FVK	Dreiecks-platten Kantenlänge $l = 2,0 - 4,50 \text{ m}$	
1955-2005	Dietz (1967), 307		vornehmlich Platten als Tragstruktur aus Sandwichplatten d=15 cm mit je 2* 1,5 mm Deckschichten	bis d = 50 m	


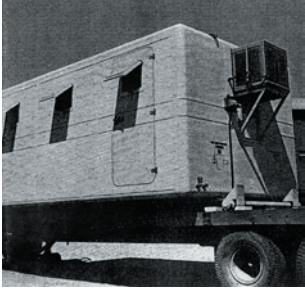
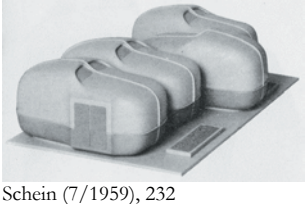
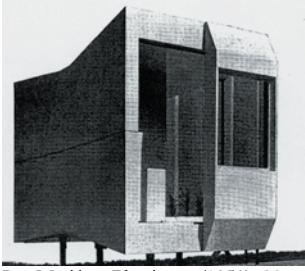

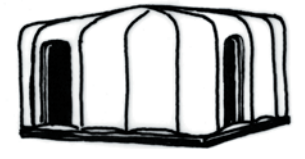
4.3 Flächige Tragwerke 4.3.1 Ebene Flächige Tragwerke 4.3.1.1 Platten					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1953	Plastic Industrie (1953), 27	Platten für Gewächshaus Fa. Monsanto-, USA GUP, Grundriß 7,50 x 5,0 m Wellplatten der Fa. Röhm und Haas GmbH Darmstadt aus GUP		Einfeldplatten l = 5,0 m	
1956	 Ganz-Plastik-Haus (1957), 57 Schein (1959), 236	Französisches Schneckenhaus, Frankreich für Exposition des Arts Menagers in Paris (Salon der Haushaltskünste), Arch: Ionel Schein Ing: Y. Magnat Herst: hauptsächlich Fa. R. Camus Cie., beteiligt an Bau und Ausstattung: Charbonnages de France und Houillères du Nord	Sandwich aus Wabenplatten und GUP Deckschichten t = 40 mm und GFK-Trägern; Achtelkreis-Elemente bei Durchmesser 10 m: Platten mit 8 tragenden Stegen , ein Auflager bildet die Mittelstütze, eines der gekrümmte Randträger	Platten auf radialem Trägerkranz, max l = 5,0 m	
1958	 Schwabe (1958), 327	Pavillon des Solvay-Konzernes auf der Weltausstellung in Brüssel	Runde Sandwichplatte Polyester-Deckplatten und Papierwaben d = 45 mm,	D = 12 m	
1959 01	 Isler (1975), 6	Überdachung für Wochenendhaus Schweiz Entwicklung: Heinz Isler Überdachung 4,50 x 9 m aus GFK, Sandwich durch GFK-Stege gebildet	zweiachsig gespannte hohle Rippenplatte, bestehend aus Würfeln, die die Stege bilden und Deckschichten	l _k = 4,50 m	
1959 02	 Frenz (1960), 360	Troisdorfer Kunststoff-Haus, BRD, anlässlich der Kunststoffmesse 1959 Arch., Ing.: Reinhold Frenz Herst.: Dynamit Nobel AG nur aus im Handel verfügbaren Kunststoffhalbzeugen, 30 m ² Grundfläche, 20 m ² überdachte Terrasse	Wandelemente 1,27 x 2,40 m Deckenelem. 1,27 x 1,27 m Sandwichplatten mit t = 1,3 mm, t _{Kern} = 22 mm	l = 1,27 m	Verbund- konstr. g = 0,0055 s, w nach DIN
1959 03	 Doernach (1960), 356	Prototyp eines Fertighauses, Ludwig Doernach, D Stuttgart erstes bewohntes (4 Jahre) Kunststoffhaus Deutschlands, Prototyp mit Modulen von 45 m ² in Sandwichbauweise, insg. 70 mm Schalenhaus mit gleichem Kernmaterial (PUR) und versch. Deckmaterial z.B. verstärktes Epoxy, Polyester, Alu, Stahl	Ebene Plattenelemente werden erhitzt und gekrümmt	Dreieckplatte mit l = 4,0 m	Sandwich g = 0,375 s, w nach DIN
1960 01	 IBK (1973), 60/01	Albaredo Haus, Italien Standort: Albaredo, Treviso Skelett- und Stützkonstr. auf Stahlgerippe, GFK – Schaum - GFK			

1960 02		Frits Bode Haus , NL Arch./Ing. Pijpers, Breda 70 m ² , 4eckiger Grundriß Wand und Dach GFK – Papierwaben – GFK profiliert auf Stahlgerippe			
	IBK (1973), 60/02				
1960 03		Überdachung Tankstelle Thun , Schweiz Entwicklung: Heinz Isler Sandwichplatte aus GFK, Stege ebenfalls GFK 14,50 x 20 m	zweiachsig gespannte hohle Rippenplatte, gefertigt aus 2 Lagen Würfeln 50x50x25 cm, Stege t = 4 mm, im Stanzkegel 6 mm; Deckschichten t = 3 mm	$l_k = 9,0 \text{ m}$	$g = 0,42$ $s = 1,30$
	Isler (1975), 6				
1960 04		Polyvilla I , Belgien Arch./Ing. Ladyjensky, Herst. Plascobel SA, Brüssel Prototyp 1968 Polyvilla II 1970 Polyvilla III, 60 m ² letztere ca. insg. 250mal gebaut 4-eckige Kabinen, 81 m ² , GFK – PUR-Schaum – GFK	Dachplatten zweiachsig gespannte GFK-Platten Wand Sandwichplatten	geschätzt $l = 4,50 \text{ m}$	
	IBK (1973), 60/04 Sacchling (1973), 508				
1961		Hülser Kunststoffhaus , BRD Chemische Werke Hüls AG 13,67 x 13,67 m Umkleidehaus für Tennisclub Sandwichkonstruktion auf Dach	zweiachsig gespannte faserverstärkte Wellplatten auf Stahlunterkonstr.	$l_k = 0,80 \text{ m}$	
	Kunststoffe im Bauwesen (1961), 290				
1963		FP 64 , Italien Arch./Ing.: Chantiers Fornasari, Verona Herst.: Ateliers de Mecanique Piccolboni, Vigasio einm. Ausführung, d = 7 m, 39 m ² Grundfläche Stahlskelett mit 21 räumlichen Sandwichelementen GFK – Schaum – GFK auf Stahlskelett	segmentierte runde Platte	$D = 7 \text{ m}$	
	Schwabe (8/1969), 412				
1965 01		Rheinkraftwerk Säckingen , Schweiz Arch., Ing.: Heinz Isler Sandwichplatten als rollbare Oberlichter	zweiachsig gespannte hohle Rippenplatte, gefertigt aus 2 Lagen Würfeln und Deckschichten 12 x 13 m, d = 38 cm	$l_k = 12,0 \text{ m}$	geschätzt: $g = 0,35$ $s = 1,30$
	Isler (1975), 6				
1965 02		Oberlicht der Kirche Maria Regina Fellbach Arch., Ing.: Heinz Isler runde Sandwichplatte	zweiachsig gespannte hohle Rippenplatte, rund gefertigt aus 2 Lagen Würfeln und Deckschichten $D = 7 \text{ m}$, d = 30 cm	$l_d = 7,0 \text{ m}$	$g = 0,30$ $s = 1,30$
	Isler (1975), 6 Kunststoffüberdachungen (1972), 37				

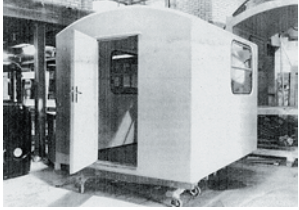
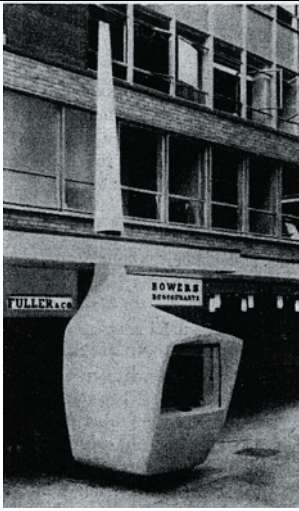
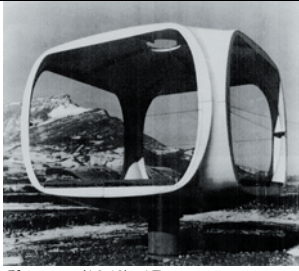
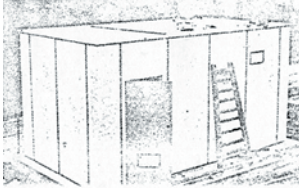
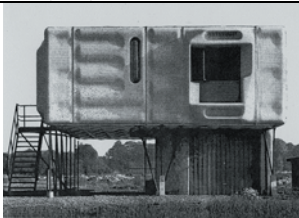
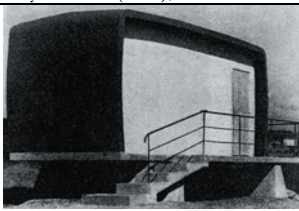
1967 01	 Isler (1975), 6	Pausenhof-Überdachung Realschule Geislingen, BRD Arch., Ing.: Heinz Isler	hohle Rippenplatten, gefügt als Faltwerk gefertigt aus 2 Lagen Würfeln und Deckschichten	$l_{\text{Faltwerk}} = 20 \text{ m}$	geschätzt: $g = 0,45$ $s = 1,30$
1967 02	 IBK (1973), 67/15	PPL Cabin (PPL-Montagehaus), Canada Herst.: Protective Plastics Ltd., Don Mills, Ont. Standort, Quebec, Canada mehrm. Ausführung, Tafelbauweise, 17 m ² GFK – PUR-Schaum – GFK			
1968 01	 IBK (1973), 68/19	BP Tankstellengebäude (für BP Petrol), GB Herst. BP Plastics, Standort Baldock, GB Prototyp, Tafelbauweise GFK – PUR-Schaum – GFK – PUR- Anstrich	Dach doppelte Kragplatte, Sandwich	geschätzt $l_{\text{Krag}} = 2,50 - 3,0 \text{ m}$	
1968 02	 IBK (1973), 68/19	Modular Housing System, GB Cholera-Station in Westbengalen Herst. Wight Plastics Ltd., Isle of Wight 6-eckiges System in Tafelbauweise, 14 m ² , GFK – PVC-Hartschaum – GFK, ohne Boden mehrmalige Ausführung	Dach zweiachsig gespannte Platten	geschätzt $l = 5 \text{ m}$	
1969 01	 IBK (1973), 68/17	System CEPLI, Italien IACPM Haus Arch.: Mario Scheichenbauer für Autonomie Institut für sozialen Wohnungsbau (IACPM), Mailand Prototyp mit 11.000 m ³ - Stahlbetonskelett aus Trägern und Pfeilern - Dachabdeckung, Außenwände, Treppenhauswände, Vordach und Lichtkuppel aus GFK	Dach zweiachsig gespannte Platten		
1969 02	 Schwabe (1971), 9	Trigon Entwurf: Justus Dahinden Herstellung: Kunststoffhaus AG Außenhaut GUP Dreiecks-Grundrisseinheiten GF ca 50 m ²	Dach und Wände Sandwich	geschätzt max $l = 5,0 \text{ m}$	
1970 01	 IBK (1973), 70/11	Dura Plex House, USA Herst. Dura Plex Industries Inc., Peoria, Illinois, einh. Ausführung, Tafelbauweise, 48 m ²			


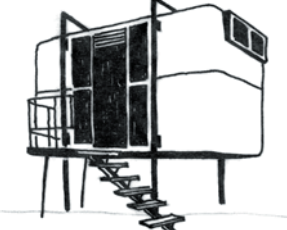
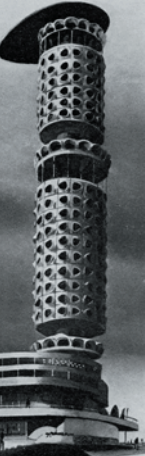
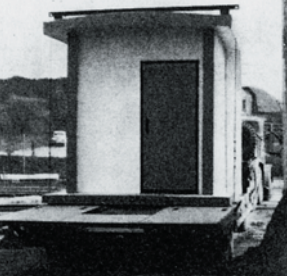


1970 02	 IBK (1973), 70/23	Polar Work Sheds, Canada für Wohn- Lager- und Werkstattzellen in Polargebieten Herst. Industrial Fiberglass Constructors, Edmonton, Canada mehrm. Ausführung, 12 m ² , Tafelbauweise	Platten von 1,07 m Breite		
1970 03	 IBK (1973), 70/18 IKA '71 (1971), 18	König-Baukasten, BRD Entwicklung: König- Unternehmensberatung, Stuttgart Platten in Sandwichkonstruktion, GFK – PUR-Hartschaum – GFK mit Verbindungselementen aus eloxiertem Aluminium Sanitärraum aus Kunststoff integriert Maßordnung: System Modul 30: Vorzugsmaße 60, 120, 180, ... cm	Einzelplatten von 1,20×1,20m oder 2,40×4,80m, d = 0,10 m	$l_x = 1,20 / 2,40$ m	
1970 04	 Saechtling (1973), 487	Stockbrae, GB Kunststoff-Ferienbungalow für Malta, in einem Stück daher keine Fugen Entwicklung und Herst.: Mickleover London mehrm. Ausführung, GFK – PUR-Schaum 5 cm – GFK	Wände und Decken Platten	geschätzt $l = 2,50 - 3$ m	
1970 05	 IBK (1973), 70/17	KB-Haus, NL Herst.: Klein-Breteler GFK-Außenschalen sind als Tragkonstruktion konzipiert, für Standortsicherheitsnachweis tragendes Holzskelett eingefügt (GUP-Schalen nur äußere Verkleidung) Skelettierte Plattenbauweise	Platten von 1,20×3,0×0,40 m	$l_x = 1,20$	
1971 01	 Hühnerfarm (1971), 14	Hühnerfarm Österreich Karl Odorizzi, Arch. Dipl. Ing Zweischaliges GFK-Element als Wand Im Handauflegeverfahren hergestellt, mit PU-Schaum ausgeschäumt	Platten von 3,0×3,0m	$l_x = 3,0$ m	
1971 02	 IBK (1973), 71/18	Pecolit, BRD Herst.: Ohler Eisenwerk, Schifferstadt einn. Ausführung, Tafelbauweise, 18 m ² als Gesamtkörper, GFK – PS- Schaum – GFK	Platten B×L = 3,0×6,0 m	$l_x = 3,0$ m	
1971 03	 Matières Plastiques 5 (1971), 5	Habitation de loisir 7 – 12 m ² Arch.: Yves Chaperot		geschätzt $l = 2,50 - 3$ m	

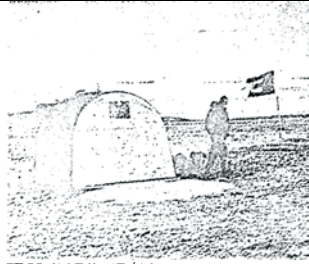
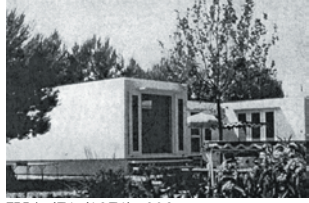



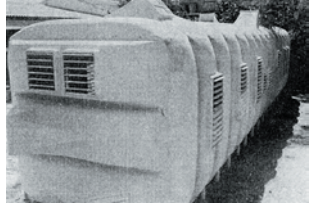
1971 04	 IKA '72 Lüdenscheid (1972), 202 Langlie (12/1972), 796	Heckel Haus , Frankreich „Horizont Vert“ Arch.: A. Heckel, Nancy einn. Ausführung addierbar, n-mal 7,5 m², Rahmenbauweise aus räumlichen Elementen GFK-Deckschichten und Kern aus UP-Hartschaum-gebundenen Leichtfüllstoffen	freitragende Plattenelemente als Rahmen von 1,20 m Breite und 7,50 m Spannweite, durch Zuganker zusammengehalten Sandwich d = 12-30 cm	l = 7,50 m	g = 0,31
1971 05	 Saechtling (1973), 524 Elementierte Bauten Nord-Kanada (1973), 330	Academic & Occupational School in Frobisher Bay , Canada Arch.: Papineau, Gérin-Lajoie, Le Blanc, Montreal Fassadenteile 1,83 m x ca. 3 m GFK, Sandwich mit 5 cm Schaumstoffdämmkern Dach: Stahlblech	zweiachsig gespannte Wandplatten	l = 3,0 m	bedeutend ist hier der LF $\Delta T =$ 70 K, $q_w = 1,25$ $w = 1,0$
1972 01	 Williams (1972), 213	Autobahn-Service-Brücke Raststätte Colley, GB Motorway service area bridge Mickleover of London Ltd Arch.: Garnett, Cloughley, Blackmore & Ass.	Haupt-Träger (Wanne) aus Beton Dach- Wandkonstr. als Sandwich 32 mm, 30 mm PUR-Kern	Deckenplatte l = 3,15 m Wände h = 1,95 m	Wind, Schnee, Eigen
1972 02	 IBK (1973), 972/03 Langlie (1976), 125 ausführliche stat. Berechnung 	Gemini Bungalow , NL Herst. Le Comte-Holland N.V., Vianen, NL Entwurf und Prototyp stammt von Concept International Enterprises Ltd., Canada von 1964 Schale, Grundrissvarianten 90 m² GFK – PUR-Schaum – GFK, t = 5 + 80 + 5 = 90 mm hölzerne Randversteifung der Schalen Musterhaus der Firma Suhrborg & Co. GmbH (1972) in Wesel-Bislich	Berechnung aufgrund geringer Krümmung der Mittelfläche nicht als Schale, sondern als Dreigelenkbogen, mit einer dazwischenliegenden Platte, prinzipiell sind Seitenteile doppelt krumme Schalen	„Seitenteile“ = Dreigelenk- rahmen $l_{\max} = 4,70\text{m}$, $h_{\max} = 3,67\text{m}$ „Mittelteile“ = Platte $l_{\max} = 7,00\text{m}$	g = 0,22 s = 0,75 q = 0,97
1973 01	 Plasticope 3 (1973), 104	all-plastics house , USA tradit. Architektur (Holzbaracke) Herst.: Dura-Plex Industries Inc., Peoria, Illinois 45 m², weiteres Modell mit 10870 m in Steelville entwickelt, Wand- und Dachplatten sind GFK- Sandwichs mit Urethanschaum als Dämmung, 7 cm dick	einachsig gespannte Platten: Dach 3,65×7,30m Wand: 1,20×2,40 m	l = 3,65 m	
1973 02	 Schrage (1975), 19	Vanessa Radgrave Nursery School , GB in Hammersmith, Arch.: Ketley, Crutch, McColl Ausführung: Consulting-Firma Fitch & Co –Integral Plastics Ltd. GFK-Elemente, besondere arch. Gestaltung und Farbkombination	ebene und gekrümmte GFK Plattenelemente auf Stahlrohr- Rahmen		


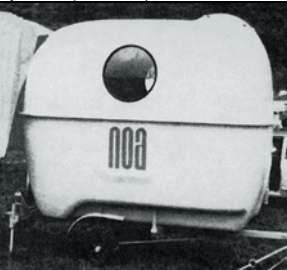

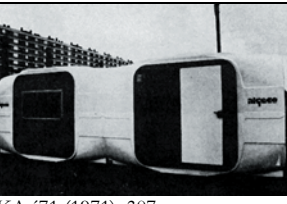

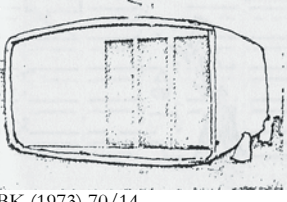

4.3.1.2 Boxen					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1956 01	 Quarmby (1974), 48 IBK (1973), 56/01 Ganz-Plastik-Haus (1957), 60	Coulon Schein Kabine , F Arch./Ing.: Coulon, Schein Ing.: Magnant Herst.: Cebums / Boulogne- Billancourt mobile Hotelkabine, 7 m ² , 700 kg GFK – GFK-Rippen – GFK: 5cm angeformte Einrichtung	geschlossene Box	l = 2 m	
1956 02	 IBK (1973), 56/04	Sahara Kabine , Frankreich Hersteller: Société Spair a Douai Forschungsstation 10,5 m ² , Prototyp GFK – PVC-Hartschaum – GFK, mit Metallkantenverst��rkung	geschlossene Box B×L×H 3,00 m x 3,49 m x 2,35 m	l = 2,35 - 3,49 m	
1957 01	 Schein (7/1959), 232	Coulon Schein Zellen , Frankreich Arch./Ing.: Coulon, Schein, Magnant Weiterentwicklung der Hotelkabine zu Bibliothek für Wanderausstellung, Prototyp in Rezeption des Büros der Caisse des Depots in Arcueil, bei Paris GFK – GFK-Rippen – GFK Oberlichter	Schalenförmige Box, aus 4 Schalen mit Versteifungsrippen B×L×H geschätzt 2,50 m x 5,0m x 2,30 m	l = 2,50 m	g = 0,08
1957 02	 Les Matières Plastiques (1959), 93	Montecatini Raumzelle , Italien Arch. C. Pea, Mailand 23 m ² , GFK – Papierwabe – GFK	4-eckige, im Raster addierbare Einheit B×L×H geschätzt 3,0m x 3,0 m x 2,30 m	l = 3,0 m	
1959	 Duflos (1961), 782	beweglicher Bungalow , Frankreich für max. 2 Personen Entw.: S.P.A.I.R. per LKW transportierbar Sandwich-Bauweise mit Polyurethan- Hartschaumkern	geschlossene Box aus Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,0m x 2,0 m x 2,30 m	l = 2,0 m	
1961 01	 IBK (1973), 61/06	RA Sub Station , GB für Royal Aircraft "South" Scotland Electricity Board, BAS Surv Herst.: Mickleover London, mehrm. Ausführung räumliche Elemente zu viereck. Quader GFK – PF-Schaum – GFK	geschlossene Box aus Plattenelementen B×L×H 2,14m x 3,05 m x 2,14 m	l = 2,14 m	


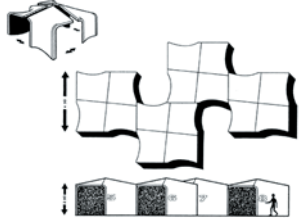

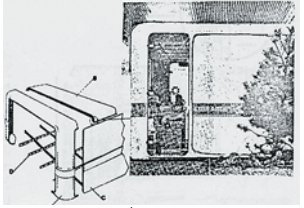
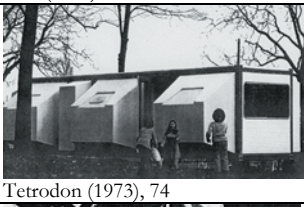


1961 02	 IBK (1973), 61/02	British Railways Relay Rooms , Relais-Häuser von British Railways, GB Arch/Ing. A. Quarmby und Appleby, Forschungsabteilung von British Railways Herst.: Mickleover of London Standort: Thameshaven, Essex, mehrm. Ausf. (über 300) 18 m² Kabinen aus räuml. Elementen GFK – PUR-Schaum – GFK Außenwände: 25 mm	geschlossene Box aus Plattenelementen B×L×H 2,14m x 3,05 m x 2,14 m	l = 2,14 m	
1961 03	 IBK (1973), 68/09	Führungsleitstand Chemische Werke Hüls, 15 m², selbsttragende Sandwichkonstruktion, Hochsockel: Beton Dach: Faltwerk Außenwände: 70 mm, GUP- Außenhaut, verformte Schale, PUR- Schaumkern, Alu-Folie, Gipsplatten innen; Dach: 65 mm, GUP-Schalen, gefaltet, PS-Schaumplatten, PS- Kassettenplatten	geschlossene Box aus z.T. gefalteten Plattenelementen B×L×H 3,60m x 1,20 m x 2,70 m	l = 2,70 m	
1961 04	 Saechtling (1973), 486	Bakelit House , GB zweigeschossige Telefonvermittlungsamt, Birmingham, Arch/Ing. Smith, Mickleover London und A. Quarmby 158 m², vorgefertigte Vollkunststoffelemente Antarctic House , GB biologisches Labor auf Signey Island, South Orkneys, British Antarctic Survey Mickleover Transport Ltd. gleiches Bauwerk in Rahmen/Segmentbauweise aus vorgefertigten Sandwichelementen GFK – Phenolharzschäum – GFK 336 m²	geschlossene Box aus gewölbten Plattenelementen B×L×H 25 m x 7,16 m x 5,80 m	l = 2,90 m	
1961 04	 IBK (1973), 61/04	Maarssen Bungalow , NL Arch. Heydenrijk Standort: Maarssen / Ermelo Prototyp, 48 m² Skelett-Stützbauweise Wand und Dach: GFK – PS- Kapillaren - GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,50m x 8,0 m x 2,30 m	l = 2,30 m	
1962 01	 Quarmby (1974), 135	Maison par elements , Schweiz Arch.: A. Christen einfache Eleganz	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,50m x 3,0 m x 2,30 m	l = 2,30 m	
1963 01	 IBK (1973), 63/01	Abitamobile , Frankreich Herst. Societe Isolfen, Societe Abita, Paris Ausstellung Paris Beaumont-sur-Oise, einmalige Ausführung, 50 m² Tafelbauweise, im Barackenstil	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 3,0 m x 4,0 m x 2,30 m	l = 2,30 m	


1963 02	 Makowski (1968a), 11	Rangier-Kabine für Brit. Eisenbahn Mickleover Transport Ltd. + Bakelite Co. Geschlossene Raumzelle, transportabel, Außenwände/Dach/Fußboden = GUP –Phenolharzschaum - GUP	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,0m x 3,0 m x 2,30 m	l = 2,30 m	
1964 01	 Kunststoffe (Heft 9/1964), 604	Verkaufskiosk, England	geschlossene Box aus gekrümmten Plattenelementen B×L×H geschätzt 1,50 m x 1,50 m x 1,50 m	l = 1,50 m	
1964 02	 Chaneac (1968), 17	Chanéac Raumzelle, Frankreich Arch./Ing. Chaneac, J. Nicoulaud Standort: Saint-Pierre-d'Albigny Prototyp, Schalenkonstruktion Kombinierbares Element mit diversen seittl. Abschlüssen	Rahmen-Box ca. 2,50 m × 2,50 m × 2,50 m	l = 2,50 m	
1965 01	 IBK (1973) 65/01	BR Development Unit, GB British Railways Tafelbauweise im Raster, 21 m², mehrf. Ausführung PUR-Anstrich – GFK – Papierwabe – GFK – PUR-Anstrich	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen 1,22 m × 2,90 m	l = 2,90 m	
1965 02	 Meyer-Bohe (1966), 299	Biberach-Haus, BRD Arch. Dieter Schmidt Herst. Fa. Georg Schmid KG, Biberach Stahlkonstruktion mit selbsttragenden GFK-Sandwich Außenfassaden, 7 versch. Elemente, von außen nach innen: GFK – Schaumstoff – Spanplatte - PVC-Überzug GFK-Sanitärzelle	geschlossene Box aus gewölbten Plattenelementen B×L×H 6,40 m x 12,0 m x 2,50 m	l = 4 m	
1965 03	 IBK (1973) 65/09 Hanusch (1976), 865	Montazni Relaisstation Herst. Montazni, Prag, CSSR mehrmalige Ausführung, Schale als viereckiger Gesamtkörper, Faserspritzverfahren 125 mm stark 200 Stück für Post produziert GFK – Wellkern – GFK	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,0m x 4,0 m x 2,20 m	l = 2,20 m	


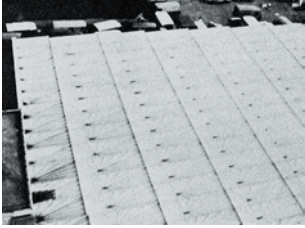

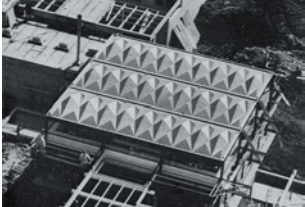
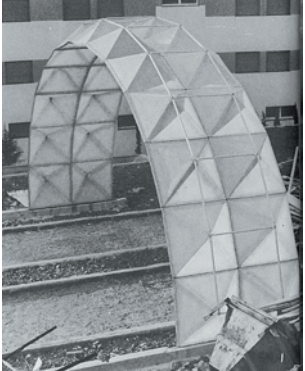
1965 04	 IBK (1973) 65/04	Instant House , Australien Canberra Arch.: Warren Herst.: L.T.D. oder Rondavel Product Pty, mehrm. Ausführung runder Grundriß von räuml. GFK- Elementen	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen		
1966 01	 IBK (1973) 66/11	Sekisui Kabine , Japan Sekisui Chemical Co., Osaka mehrm. Ausführung, 12 m ² , räuml. Elemente zu Quader gefügt in GFK – PS-Schaum – GFK, Alu-Folie (innen-außen)□	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,0m x 3,50 m x 2,30 m	l = 2,30 m	
1966 02	 Schwabe (12/1968), 871	Futurhotel Projekt, NL Futurotel Projekt Arch. De Vries, R. Das Auftraggeber: Krasnapolsky Hotel, Amsterdam 2-stöckig, in NL entwickelt Kabinen mit 2 x 27,5 = 54 m ² Grundfläche, GFK – Schaum – GFK	2-geschossige Wohnboxen an Stb.kern angehängt		
1966 03	 IBK (1973) 66/07	Montazni Kleinhaus Prag 4eckiger Grundriss Sandwich: GFK – Wellkern – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 2,0m x 2,0 m x 2,30 m	l = 2,30 m	
1967 01	 IBK (1973) 67/12	Maritchu Haus , Frankreich einmal. Ausführung, Tafelbauweise, 50 m ² Sandwichelemente 3,6 x 3,6 m GFK – Schaum – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 3,60 m x 3,60 m x 2,30 m	l = 3,60 m	
1967 02	 IBK (1973) 69/10	Guscio Touristenkabine , Italien Arch. Roberto Menghi, Mailand Herst. Xilographia Milanese, Mailand mehrm. Ausführung, 6 m ² pro Raumzelle 4-eckige Zellen aus räuml. Elementen, addierbar, GFK – PUR-Schaum – GFK	geschlossene Box aus gewölbten und geraden Plattenelementen r = 1,0 m geschätzt	r = 1,0 m	

1967 03	 IBK (1973) 67/19	Spitzbergen Iglu Herst. Friedrich Vorländer, Würzburg mehrm. Ausführung, 6 m ² , Raumzelle GFK – Schaum – GFK	geschlossene Box aus gewölbten und geraden Plattenelementen r = 1,0 m geschätzt	r = 1,0 m	
1968 01	 IKA '71 (1971), 309	Henon AN 2000 , Frankreich Arch./Ing. Henon, Herst. Albert Henon kombinierbare Raumzelle 21 m ² , GFK – Hartschaum – GFK aus Sandwichplatten zusammengebaute Zelle, Innenausbau mit Holzplatten	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 2,85 m x 7,50 m x 2,60 m	l = 2,60 m	
1968 02	 Fomekk Archiv (2004) IBK (1973) 69/05	CF 10 , FIN z.B. Tankstellengebäude für Gulf Oil, Arch. Matti Suuronen Herst. Polykem AB, Helsinki, FIN Standort Lempaala mehrm. Ausführung, 200 m ² Schalenkonstruktion, GFK-Schaum – GFK 9 m ² 4-eckige Rahmenbauweise, in Kombination mit CF 100/200 vorzufinden sh. 4.3.2.1-1972	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 2,40 m x 3,70 m x 2,60 m	l = 2,60 m	
1968 03	 IBK (1973) 68/10	Ekistikit, Fun-Centre , Ausstellungslandschaft, „fun fair“, Sphere-Building-System, GB Arch/Ing. Keith Albarn & Partners Ltd. Herst. Artech Plastics Engineers Ltd., GB für Ausstellung fun-fair, GB mehrm. Ausführung, GFK – PUR- Schaum – GFK	ovale Grundfläche, Durchmesser: 1,20 – 2,40 m, Halbkugel/Zylindrische Körper in Schalenbauweise,	l = 2,40 m	
1968 04	 IBK (1973) 68/13 Saechtling (1973), 461 Facing (1969), 63	Filament Wound Home , für US Dept. of Defence, USA Arch/Ing. Paraskevopoulos, Architectural Research Institute Uni Michigan Herst. Aerojet-General Corp. und Uni Michigan einmalige Ausführung, 68 m ² einer Zellstruktur, GFK – PUR-Schaum – GFK	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 1,20 m x ? x 2,40 m 1-2 geschossig, addierbare Einheit	l = 2,40 m	
1968 05	 IBK (1973) 68/07 Forum (1971), 38	Kubanisches Kunststoffhaus , Kuba Arch.: Hugo d'Acosta Calheiros, Mercedes Alvarez 0,90 x 2,70 m ein Bauelement, aneinandergereiht	Reihung von Rahmen-Boxen 0,90×2,70 m	l = 2,70 m	

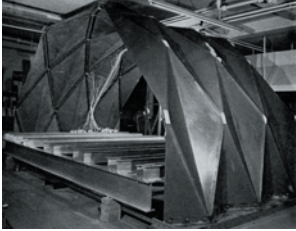

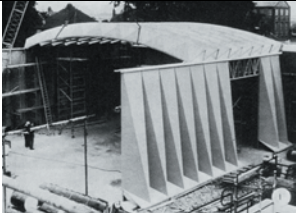

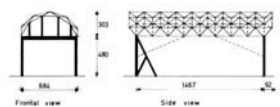


1969 01	 Laperelle (1969/70), 60	Moultip Bungalow , Frankreich "Hexam" Arch. Laperelle Herst. Societe Diffusion Industrielle, einn. Ausführung, 13 m ² , Kabine GFK – PF-Schaum – GFK	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 3,60 m x 3,60 x 2,30 m	l = 3,60 m	
1969 02	 Kunststoffhäuser in Japan (1971), 282	Noa , Japan Minihaus, Campingtrailer, Hausboot mehrm. Ausführung Kabine 5 m ² ,	geschlossene Box aus gewölbten Plattenelementen B×L×H 1,68 m x 2,70 x 2,14 m GFK einschalig t = 4 mm	l = 2,70 m	g = 0,07
1969 03	 IKA '72 Lüdenscheid (1972), 202	Riba (Richter Elta) Haus , BRD Arch./Ing.: Richter, Essen Herst.: Riba Fertighaus GmbH, Siegertsdorf Standort: Villingen, Olympisches Dorf, Bergen Grundeinheiten: 6 x 6 m, 6 x 6,7 m, 7,6 x 7,6 m mehrm. Ausführung, addierbar, 4- eckig, in 3 Größen 28 / 38 / 51 m ² , Textil – Schaum – GFK (anstatt Textil auch Holz oder GFK)	geschlossene Box aus gewölbten Plattenelementen B×L×H 6,0 m x 6,0 x 2,10 m GFK Sandwich d = 80 mm auf BSH Trägern !! Dachelemente ca. 3,0 x 3,0 m	l = 3,0 m	
1970 01	 IKA '71 (1971), 307	Algeco 2002 , Frankreich Herst. Algeco Paris, mehrm. Ausführung transportable addierbare Raumzellen , 29 m ² GFK – PUR-Schaum – GFK	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 3,75 m x 2,40 m x 2,40 m Sandwichkonstruktion	l = 2,40 m	
1970 02	 IBK (1973) 70/05	Bivakschachtel , Österreich variable Unterkünfte für Not, Jagd, Rettung, Forschung Arch.: Dr. Ohnmacht, Innsbruck Herst.: Anton Fritz, Innsbruck, mehrm. Ausführung, räuml. Elemente in Mischsystem, GFK – PUR-Schaum – GFK auf/an/in Stahlrohrrskelett (mero) montiert	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 3,0 m x 3,0 x 2,30 m	l = 2,30 m	
1970 03	 IBK (1973) 70/14	GFG Zelle , USA Ferienhaus Herst.: GFG Industries einn. Ausführg, 33 m ² , 4-eckiger Gesamtkörper GFK – PUR-Schaum – GFK	halboffene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H geschätzt 3,0 m x 2,40 m x 2,40 m Sandwichkonstruktion	l = 2,40 m	
1970 04	 IBK (1973) 70/15	HL Raumzellen Herst. Heinrich Lenhard KG, mehrm. Ausführung, Gesamtkonstruktion addierbar 2,8 m ² , GFK – PUR-Schaum – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 1,20 m x 2,40 x 2,40m	l = 2,40 m	


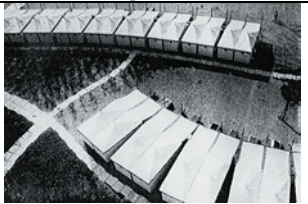

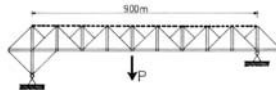
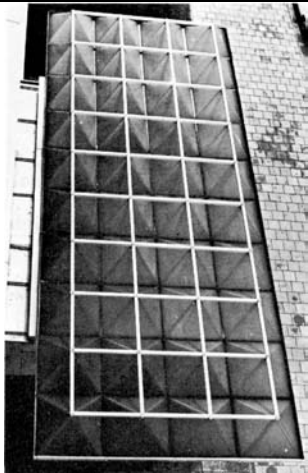


1970 05	 IBK (1973) 70/16	House Road , Belgien Wohnwagen Herst.: SA des Ateliers Belges Reunis 10 m ² , einm. Ausführung, Kabine GFK – PUR-Schaum – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 2,06 m x 4,93 x 2,50m	l = 2,50 m	
1971 01	 IKA '72 Lüdenscheid (1972), 201	Avio Fokker , NL Herst./ Ing. Avio Fokker, mehrf. Ausführung, 4-eck. 20 m ² , Schalenkonstruktion, räumliche Elemente, 500kg pro Grundquadrat	geschlossene Box aus Addition von winkelförmigen Grundelementen GFK einschalig 450 x 450 cm	l = 4,50 m	g = 0,25
1971 02	 Forum (1972), 528	Europa Kiosk , Schweiz Herst.: Eschmann AG, Thun für Olympiade '72 und Schweiz, mehrf. Ausführung, Raster, n-mal 1,5 m ² , räumliche Elemente als Zelle, evtl. PUR-Schaum – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 1,50 m x (n × 1,0) x 2,20m	l = 2,20 m	
1971 03	 IBK (1973) 71/14	Loewy Zelle , Frankreich Arch.: CEI Loewy, Paris, Herst.: SIREN, Standort: Tankstellen in Dijon, Hamburg, Turin (F, D, I) mehrf. Ausführung, flexibel 12,5/19/25 m ² , Zellen, GFK – PUR- Schaum – GFK	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen B×L×H 2,50 (5,0) m x 5,0 x ?	l = 2,50 m	
1971 04	 Tetradon (1973), 74	Tetradon , Frankreich Design: A.U.A., Berce, Ciriani, Corajoud, Huidobro, Loiseau, Tribel Konstrukteur: Gruppe „Barbot“ in Ausstellung „Design Francais“ in Stahlrahmen angehängte räumliche GFK-Teile	Box aus Dreiecks- und Rechteckelementen Einheiten von B×L×H 2,40×(n×3,0) × 2,40 m	l = 2,40 m	
1971 05	 Matières Plastiques 5 (1971), 39	Miroleg Architekt : G. Grandval Büros der Gesellschaft Travail Aérien à Algier	schalenförmige Box mit Rastermaß 1,85 m	l = 1,85 m	
1971 06	 Scheichenbauer (1974), 4	System Ponza , Italien Arch.: Mario Scheichenbauer, Mailand ursprünglich als Ferienhaus, dann als Typenprogramm weiterentwickelt, z.B. ein Fremdenverkehrsdorf für ital. „Touring Club“ realisiert vier Elemente: Fußboden, Wandelement, Dach, Dachträger Wandelemente GUP-Schalen mit Unterteilung, vor Ort Füllung mit Wärmedämmung oder Sand, Kies für Beschwerung	geschlossene Box aus gewölbten und geraden Plattenelementen max. 2,50 × 2,50 m	l = 2,50 m	g = 0,03


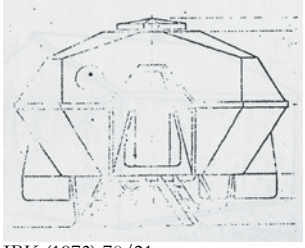

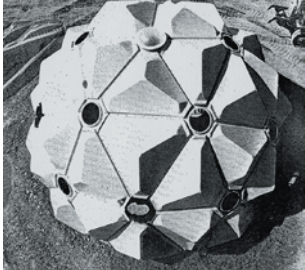


1972		L'Hexacube auch CUBING genannt , Frankreich Kunststoffraumzellen als Ferienhaus Arch.: Georges Candilis, Anja Blomstedt, Paris von CIFAM aus Toulouse hergestellt Sandwich, 3 m x 3 m	geschlossene Box aus Rechteckelementen Einheiten von ca 2,0x2,0 x 2,20 m	l = 2,20 m	
	Mühlestein (1973), 144				
1973 01		Yadokari Kunststoffraumzelle , JP Entwurf: Ken Nishizawa & Noriyuki Asakura GK Industrial Design Inst., Tokyo Herst.: Nikko chemical Industry Co. Ltd., Tokio Ferienunterkunft, kombinierbar 18 m², 3 t Gewicht, 4mm GFK – 70-140 mm Glasfaserdämm.– Sperrholz	GFK Zelle mit Stahlrahmen Verstärkung	l = 1,20 m geschätzt	
	Mühlestein (1973), 138				
1973 02		Shell-Tankstellenausrüstung , Frankreich Entwicklung: Raymond Loewy, Paris Raumzellen, kombinierbar	GFK Zelle auf Stahlboden verschraubt	l = 2,0 m geschätzt	
	Mühlestein (1973), 148				
1973 03		Dauerbivak am Dolent , Schweiz Entw.: Prof. Dr.-Ing. R. Ekchian, IASS, I.C.P., Romont Unterkunft von 12-14 Personen Schutzhütte für Bergsteiger 3 mm GFK – 40 mm PUR-Schaum – 3 mm GFK	5,86 m x 2,70 m	l = 2,70 m	Schneelasten für HÜNN 2600 m s ≥ 5,0
	IBK Bibliothek (2004) Ekchian (1974), 299				
1974 01		Habitat , Süd Afrika Entwickler: Anchorline Products (Pty), Durban mehrm. Ausführung modulare System mit Grundelement von quadratischem 2,4 m Kubus, Sandwichplatten, die über patentierten Clipsystem verbunden	geschlossene Box aus geraden Plattenelementen BxLxH 2,40 m 2,40 x 2,40m	l = 2,40 m	
	IBK Bibliothek (2004)				
1974 02		Ski lodge units Komatsu Plastic Industry Japan GFK-Haut mit Holzrahmen Kann direkt in den Schnee gestellt werden oder auf 4 Ständer	geschlossene Box aus gekrümmten Plattenelementen geschätzt d = 2,0 m	d = 2,0 m	
	Quarmby (1974), 124				

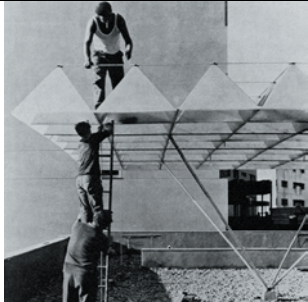
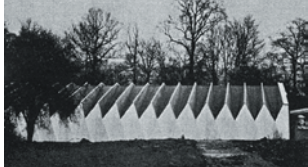
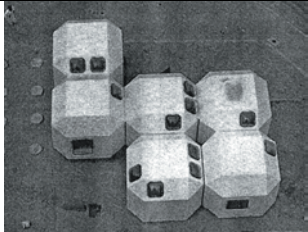
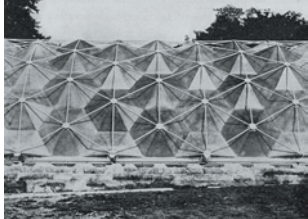


4.3.1.3 Faltwerke (membrankraftbeansprucht, kleine Kräfte)					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1962	 Saechtling (1973), 502	Unidome, GB Wochenendhaus oder Abstellräume Herst.: English Electric Company	Polyeder-Faltwerk aus Dreieckselementen d = 8,7 m, vorgefertigte Kuppel GUP-Platten mit Randverstärkung, t = 1,5 mm	D = 8,7 m	
1964	 Schwabe (1968), 868	Markthalle Epinay 144 GUP-Pyramidensegmente auf Stahlstützengerüst gesetzt, je Element 70 cm hoch, 155 kg schwer, Wanddicken 2,5 mm (Fläche), 5 mm (Rand), Flächen profiliert, Lichtdurchlässigkeit 35 %	Addition von einzelnen Pyramiden-Faltwerken (= Polyeder) 6x2m, einfache lineare (radiale) Faltung, auf Stahlträgerrost gebettet, insgesamt 30x50 m	l _x = 5,50 m	g = 0,13
1965 01	 Scheichenbauer (1974), 2 Saechtling (1973), 493	Dachsystem OGAMMA auch Monopiano-System Arch. Mario Scheichenbauer Herst.: Fa. Resine Prodotti Derivati (RPD), Mailand Standort: Malante/Varese – See; Sole mio-Lugano Einfamilienhaus ca. 100 qm, Fugen verklebt, auf Stahlgerippe	Dach: Überlagerung von Polyeder-Faltwerk (Hauptfaltung = Pyramide) und einfache prismatische Falte (Nebenfaltung) Faltplatte, GFK mit Polystyrolschaumstoff gefüllt, 4,50x4,50 m, t=70mm Wandelement: GFK - GFK-Wabenkern – GFK Außenwandelement: 87,5 x 260 x 8 cm	l _x = l _y = 4,5 m auch rund D = 7,50 m	g = 0,19
1965 02	 Saechtling (1973), 492	Dach Derriaghy Garden Centre, Nordirland Mickleover Transport Ltd. mehrfach in GB und mittlerem Osten ausgeführte Dachkonstruktion einer Faltkonstruktion mit tragender Außenhaut, GFK ein Element wiegt 350 kg	Faltplatte einschalig Flächen mit gegenläufiger prismatischer Faltung 4,0 x 12,20 m	l _x = 4,0 m	g = 0,07
1965 03	 Compagno (1991), 48	Räumliche Strukturen in Genua (I) Entwurf: Renzo Piano und Forschungsgruppe, ungerichtetes Baukastensystem, in beiden Richtungen erweiterbar, 1: Experiment Grundelemente nach oben gerichtet 1,20x1,20x0,60 m, 10 kg aus GFK im Niederdruckverfahren hergestellt	Einachsiges Faltwerk, Addition von Pyramidenelementen, mit Vierkantrohren oder Seilen verbunden Raumgitter-Flächentragwerk bogenförmige Anordnung: D = 25,70 m bei B = 6,84 m ebene Anordnung: durch kontinuierliche Verbindung der Spitzen wird Tragwerk zum Raumgitter-Flächentragwerk,	D _{max} = 25,70m	g = 0,07
1965 04	Compagno (1991), 50	Räumliche Strukturen in Genua (I) wie vor hier: 2. Experiment, Grundelemente nach unten gerichtet, 1,20x1,20x0,50 m, 25 kg			

1966		bewegliches Dach einer Aufbereitungsanlage für Schwefelerz, Italien bei Rom Arch. R. Piano und sein Forschungsinstitut rhombische Segmente, 2,72m x 1,20m, 14 kg pro Segment, 30% lichtdurchlässig	Tonnengewölbe aus einschaligen, gegenläufiger prismatischer Faltung, GFK-Segmenten in Rhombenform	D = 10 m	g = 0,04
	Saechtling (1973), 489 Makowski Renzo Piano (1969), 13; Huybers (1973), 107 Compagno (1991), 56				
1967 01		Sharm e-Sheikh Charm el Sheik Bungalow, Israel Hoteldorf mit 30 Bungalows Arch./Ing.: Ariel Sharon, Eldar Sharon und Partner, Tel Aviv 18,3 m², GFK – PUR-Schaum 48 mm – GFK	Polyeder-Faltwerk x-Eck aus Oktaeder entwickelt Mischkonstruktion aus Tafelplatten und räumlichen Elementen, 5-eckige Platten 2,78x2,78x0,65 m 4-eckige Platten 1,62x1,62 m	r = 4,86 m l _{Platte} = 2,78 m	
	Coques Charm Cheikh (1973), 98				
1967 02		Pausenhof-Überdachung Realschule Geislingen, BRD Arch., Ing.: Heinz Isler	hohle Rippenplatten, gefügt als gegenläufige prismatische Faltung Faltwerk gefertigt aus 2 Lagen Würfeln und Deckschichten	l _{Faltwerk} = 20 m	geschätzt: g = 0,45 s = 1,30
	Isler (1975), 6				
1968 01		Clamp System, GB Mickleover Transport Ltd. Arch. James Dartford L-förmige Sandwichelemente mit GFK und Phenolharzschäum 19 mm, (auch einschalig), paarweises montiert, Portalrahmen mit Normbreite von 1,026 m, lichte Weite normalerweise 5,23 m, auf 9,14 m erweiterbar, ein Element ca. 70 kg	Rahmen, zusammengesetzt aus je 2 L-förmigen einschaligen Elementen L = 5,30 m, H = 2,65 m gegenläufiger prismatischer Faltung	l = 5,30 m	g = 0,09
	Saechtling (1973), 492				
1968 02		BP Tankstellengebäude (für BP Petrol), GB Arch.: A. Quarmby Herst. BP Plastics, Standort Prototyp, Tafelbauweise GFK – PUR-Schaum – GFK – PUR-Anstrich	Gefaltete Platten mit einfacher prismatischer Faltung	l = 2,30 m geschätzt	
	Quarmby (1974), 136				
1968 03		Mujeres Ferienhaus, Mexiko Arch/Ing. Juan Jose Diaz Infante, Mexiko City, Standort: Mujeres Inseln, 300 Stück, 55 m² Sandwichbauweise GFK – PS-Schaum – GFK	Durchkreuzendes Faltwerk aus gegenläufiger prismatischer Faltung räuml. Elemente D = 5,10 m, H = 2,55 m	D = 5,10 m	
	Kunststoff-Überdachungen (1972), 38				
1968 04		Schweppes Tunnel, GB Waschtunnel für LKW Herst. Mickleover Ltd. London, einm. Ausführung 110 m², G = 2,20 kN	Einachsiges Faltwerk gegenläufige prismatische Faltung Elementen aus GFK	L = 3,9 m, H = 3,9 m, b = 1,45 m	
	IBK (1973), 68/25				




1968 05	 <p>Saechtling (1973), 489 Makowski, le centre de recherches (1968), 13 Kunststoffüberdachungen (1972), 38</p>	<p>Battersea Faltragwerke, GB an der University of Surrey (ehemals Battersea College) entwickelte Faltragwerke aus GFK, unter Leitung von Z. S. Makowski</p>	<p>Einachsiges Faltwerk Tonnengewölbe, gegenläufige prismatischer Faltung gleichförmige Rautenelemente</p> <p>Standardausführung: 18 m Spannweite, 9 m Stich Leichte Ausf.: Spannweite 6-16,5m, Stich 5,10 m</p> <p>hier Sandwich 2×1,6 mm GFK, 12,5 mm PUR</p>	<p>leinschalig = bis 25 m darüber Sandwich</p> <p>hier l = 7 m</p>	
ca. 1968 06	 <p>Kunststoffüberdachungen (1972), 38</p>	<p>Sporthalle Hilton Red House Herst.: Davidson & Co.</p>	<p>Durchkreuzendes Faltwerk gegenläufige prismatischer Faltung</p>	<p>D = 7,5 m</p>	
1968 07	 <p>Schwabe, Möglichkeiten und Grenzen (1971), 6</p>	<p>Lagerhaus Firma Scott Bader bei Wollaston, Northamptonshire, GB Entwicklung: Scott Bader Services Ltd. 15,25 m x 15 m und 6 m bis Traufkante, verlängerbares Gebäude GUP-Dachwerksträger aus Pyramidenelementen, b = 1,25 m, 320 kg, Seitenwand gleiche Faltwerk-Wandelementen, b = 1,25 m Plattenkanten sind örtlich mit GFK-Rippen verstärkt, G = 68 kg</p>	<p>Einachsiges Faltwerk, versteifte einlagige Elemente Einfache prismatische Faltung Dach: leicht gekrümmt</p>	<p>l = 15,25 m</p>	<p>g = 0,17</p>
1968 08	  <p>Huybers (1972), 209</p>	<p>Marktüberdachung, Hague NL Entw.: Pieter Huybers am Stevin Laboratory of the Civil Engineering Department of the Delft University of Technology Prototyp und Varianten, Untersuchung verschiedener Elementtypen aus GFK Dicken von t = 4 mm bis 11 mm Standzeit 9 Monate (14. Juni 1968 bis 23. März 1969) Belastungsversuche im August 1970</p>	<p>Tonnenschale aus Pyramidenelementen GFL 50×50 cm, Höhe 15 cm Stabilisierungsscheiben: Vierendeelträger aus Stahl</p>	<p>Prototyp: B/L = 6,80/14,70 m</p> <p>2. Variante: B/L = 6,80/20,80 m</p>	<p>g = 0,25 GFL g = 0,16 GFL s_{gesch} = 0,75</p>
1969 01	  <p>Zerning (1975), 56 plasticconstruction (6/1972), 76-77</p>	<p>Dreizeiliger Versuchsbogen, System Tensilarc, USA Entw.: Uni Tensile Coporation, Salt Lake City</p> <p>Prototyp: 60 Pyramidenelementen in Salt Lake City (Park Forst South)</p> <p>Realisationen: 540 Pyramidenelemente, 2,5 m x 2,5 m Überdachung einer Kunsteisbahn in Park Forest South, Illinois</p>	<p>Bogen aus Pyramidenelementen 2,5×2,5 m, die an den Spitzen durch Zugkabel verbunden sind, $f \cong 1/71$</p>	<p>L = 45 m</p>	



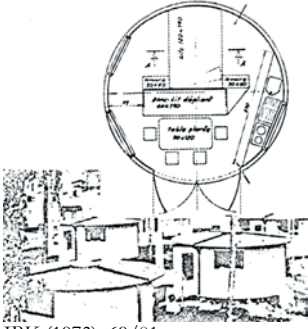
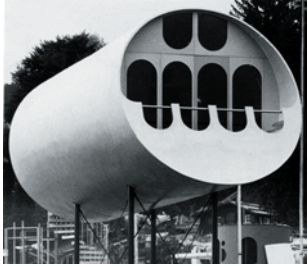

ca 1969 02	 Materies Plastiques 5 (1971), 57	Systeme Diaspere , F Dubigcon-Normandie Constructeur: Brevet Marques	Einachsiges Faltwerk aus Pyramiden mit ungleicher Grundfläche die Dachform ist kein Bogen sondern ein Kugelausschnitt	$l = 25 \text{ m}$	$g = 0,055$
1968 09	 Moor Lido. In: Architectural Review (7/1968), 68	Moor Lido Arch.: Robert Menghi und Ignazio Gardella Neuaufbau des Beach Excelsior Hotel, Venedig nach Überflutung, 300 Baumwoll-Zelte mit Pyramidendächern	Einfache rechteckige Pyramide	$L/B = 2,5/5 \text{ m}$ geschätzt	
1970 01	  Huybers (1972), 40	Eingangsüberdachung Delft NL Entw.: Pieter Huybers am Stevin Laboratory of the Civil Engineering Department of the Delft University of Technology	Einachsiges Faltwerk aus Pyramiden mit Stahlrohren verbunden Pyramiden $1,40 \times 10,40 \text{ m}$, Höhe $1,0 \text{ m}$ Durchbiegung $f < 1/500$	$L = 9 \text{ m}$	$g = 0,09$
1970 02	 Huybers (1972), 38	Überdachung aus typ. Serienelementen , Arnhem NL Entw.: P. Huybers am Stevin-Labor Delft ebene Anordnung aus 40 Pyramiden $1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$	Einachsiges Faltwerk , Addition von Pyramidenelementen, mit Vierkantrohren	$L/B = 10/4 \text{ m}$	
1970 03	 Kunststoffüberdachungen (1972), 38	private oder schulische Schwimmbadüberdachungen , GB Faltkonstruktion aus GFK Fa. Scott Bader, Wollaston oder Formplus Ltd., London serienmäßige Fertigung von vielfach kombinierbaren Elementen, versch. Konstruktion	Einachsiges Faltwerk gegenläufige prismatische Faltung, Rautenelemente einschalig Spannweiten bis zu 10 m bei 35 m Länge und 10 m Scheitelhöhe	$l = 10 \text{ m}$	
1970 04	 IBK (1973) 70/09	Do - Bausystem , BRD Arch./Ing. Polyteam Jean Clause Ventalon & Ana Sklenar, Universität Stuttgart Herst. Fibron, Bretten Dodekaeder-Grundzelle aus 6 gleichförmigen Sandwich-Schalen, 7 m^2 Grundzelle	Polyeder-Faltwerk Dodekaeder aus Dreieckselementen $D = 3,0 \text{ m}$, vorgefertigte Kuppel GUP-Sandwich mit Ausdehnungen der Plattenteile $2,0 \times 2,0 \text{ m}$ 2 bis $2,5 \text{ mm}$ GFK Deckschichten und 60 mm Schaumkern	$D = 3,0 \text{ m}$	


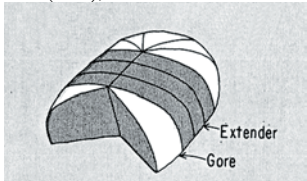

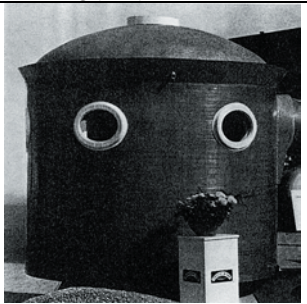
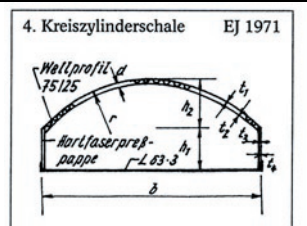


1970 05	 IBK (1973) 70/19	Maison 12 E Raumzellen-Bausystem , Frankreich Arch.: Atelier 4 (Pierre und Robert Fort, Francis Castaigns, J. Henri Colzani und Segundo Gonzales), Toulouse einst. Ausführung wählbarer Grundriß 18/31/44 m ² , geschlossen oder mit Öffnungen kombinierbar, stapelbar GFK – PUR-Hartschaum – GFK	Polyeder-Faltwerk aus Addition von winkelförmigen Grundelementen 2,45 m x 2,45 m x 1,73 m Zusatzelement quadrat. Flanschstück mit 2,45 m Seitenlänge als Bodenfläche	D = 2,45 m	g = 0,12
1970 06	 IBK (1973) 70/21	Pandora 99 , Japan Herst. Taiyo Kogyo Co Ltd., mehrm. Ausführung 10 m ² , 3-eckiger Polyeder, Kabine aus räumlichen Elementen, GFK einschalig auf Stahlrohrgestell	Polyeder-Faltwerk aus geraden Plattenelementen		
1970 07	 Detail (5/1970), 975	Polyeder Entwicklung: Keith Critchlow, London GFK-Polyurethan-Sandwichkonstruktion, vorwiegend Dreieckflächen, variabel kombinierbar	Polyeder-Faltwerk aus Dreieckselementen		
1970 08	 IBK (1973), 1970/26 IKA '71 (1971), 14	RW System , BRD Entwicklung: Projektgruppe Polytem, W. Pimpl und C. Stenzel, Stuttgart Herst.: Fibron, Bretten 10 m Durchmesser, 75 m ² , h = 5 m, d = 5 mm Faltwerk aus räuml. dreieckförmigen Pyramiden-Elementen, GFK einschalig Fenster: PMMA Aus RW-Schalen können Kuppeln, ebene und einseitig gewölbte Überdachungen gebildet werden., Glasfaserspitzen auf Holzform Ca. 1500 kg	Polyeder-Faltwerk Faltwerk als geodätische Struktur einschalige Pyramiden t = 5 mm	Pyramidenlänge 1,80 – 2,0 m D = 10 m	
1970 09	 Saechtling (1973), 207	Staatsdruckerei in Nouakchott, Mauretanien Arch./Ing.: G. Lippsmeier Starnberg und Euroform Aachen Herst.: Aco Severin Ahlmann, Andernach Elemente t = 3mm, verstärkter Rand 900 m ² überdacht	Pyramiden-Faltwerkelemente 1,88x2,80 m auf Mero-Rohrgerüst	l = 1,80 m	
1971 01	 Saechtling (1973), 455	Pappeder 26 , BRD Olympiade '72, München Arch.: 3h design, Stuttgart Herst.: Arge Pappeder, Salach mehrm. Ausführung, Kabinen 11,5 m ² /16 m ² Außenfläche fugenlos GFK – Wellkarton – GFK, Fenster PMMA - Pappeder 62 von 1970 für Ausstellung in Zürich, Prototyp - Pappeder Apartment als Studenten Wohnheime (1972)	Polyeder-Faltwerk aus Dreiecks- und Rechteckelementen Einheiten von 3,0x3,0 x 2,50 m	l = 2,50 m	



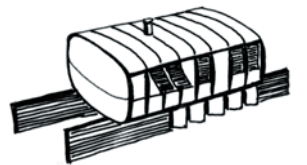


1971 02	 Makowski (6/1969), 12; Saechtling (1973), 494	Überdachung aus typ. Serienelementen , Italien Entw.: Renzo Piano Grundelement Pyramide aus einlagigen GFK, 1,20 m Seitenlänge, h = 0,60 m mit GFK-Vierkantrohren verbunden, die mit Polyurethanschaum gefüllt sind	Einachsiges Faltwerk , Addition von Pyramidenelementen, mit Vierkantrohren oder Seilen verbunden Raumgitter-Flächentragwerk bogenförmige Anordnung: D = 25,70 m bei B = 6,84 m ebene Anordnung: durch kontinuierliche Verbindung der Spitzen wird Tragwerk zum Raumgitter-Flächentragwerk,	$D_{\max} = 25,70$ m	$g = 0,07$
1970 03	 Forum Bauen und Wohnen (1971), 378	Hallenkonstruktion , GB Entwicklung: Fa. Anmac Ltd. Nottingham Lichtdurchlässigkeit von 70% Verbindung durch Aufkleben von PVC-Rohrstücken	Addition von linearen Faltwerken, Einfache prismatische Faltung 18 m Spannweite bei einschaligem GFK und b = 1,20 m und Scheitelhöhe 9 m, für Sandwichbauten noch größer	$l = 18$ m	
1972 01	 Mobile Leichtbaueinheiten (1973), 109	Casanova 2400 , BRD Arch.: 3h design, Stuttgart Herst.: Staudenmayer, Salach mehrm. Ausführung, 4-eckige Kabinen 6 m ² , Spanplatte – Schaum – Spanplatte – GFK d = 75 mm	Polyeder-Faltwerk aus Dreiecks- und Rechteckelementen Einheiten von 3,0×3,0 ×2,50 m	$l = 2,50$ m	
1972 02	 Saechtling (1973), 497	Tonnengewölbe , GB von R. C. Gilkie an Universität Surrey 5 kg/m ² incl. Aluminiumkonstr. mehrere Tragwerke nach diesem Konzept in England gebaut erste in Mill Hill in Nähe von London, Lichtdurchlässigkeit bei 80 %	Einachsiges Faltwerk , Addition von sechseckigen GFK-Pyramiden, 15 m lang, 8 m breit an Flanschen verschraubt, mit Aluminiumrohren in Form eines Dreieckgitters auf Außenseite verbunden, Raumgitter-Flächentragwerk	$l = 15$ m	$g = 0,05$ inkl. Alurohr
1973 01	 Saechtling (1973), 490	Ausstellungshalle in Torquay Demontierbares GFK-Ausstellungsgeb., von 3 Mann in 2 Tagen aufgebaut, Elemente 7,62 m lang, 1,52 m breit und 80 kg schwer, Gesamtgebäude: 25 m lang, 15,25 m breit, 2,13 m hoch	Einachsiges Faltwerk gegenläufige prismatische Faltung, Rautenelemente einschalig	$l = 15,25$ m	$g = 0,13$
1973 02	 Saechtling (1973), 490 Mühlestein (1973), 156	Passagierüberführung in Adrossan (Schottland/GB), Überdachung Schiff – Eisenbahn – Abfertigungsgebäude Arch.: Graham Law, James Dunbar-Nasmith Ing.: Ove Arup & Partners transparentes GFK-Faltwerk, 91 m Länge aus 75 selbsttragenden, einschaligen GFK-Elementen einschließlich Spezialformteilen für Zusammenbau und Winkelstücken	Zweigelenkrahmen gegenläufige prismatische Faltung Rahmenbreite 3,05 m Rahmenhöhe 2,45 m Element-Stich 30 cm	$l = 3,05$ m	



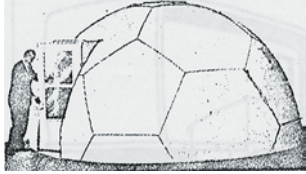

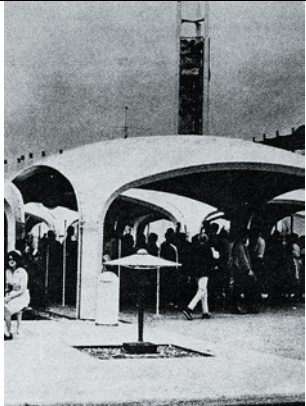
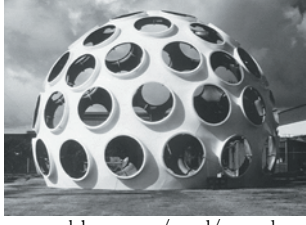

Zusammenfassung Faltwerke					
1962-1972	Nach Tabelle;		Einachsige Faltwerke Einfache prismatische Faltung Platte, Wände	$l = 15-18 \text{ m}$ $h = 2 - 6 \text{ m}$	
1962-1972	Nach Tabelle;		Einachsige Faltwerke Gegenläufige prismatische Faltung Tonnen, Kuppeln	$l = 5 - 25 \text{ m}$	
1962-1972	Nach Tabelle;		Pyramidische Faltung Tonnen	$l = 5 - 25 \text{ m}$	
1962-1972	Makowski (1968), 18;		Pyramidische Faltung Raumgitter-Flächentragwerke (Einheiten aus Pyramiden und Stäben)	Eben: $l =$ Gekrümmt: $l = 15 - 25 \text{ m}$	Pyramiden- elemente einschl. Alurohren: $g = 0,05 - 0,12$
1962-1972	Nach Tabelle;		Pyramidische Faltung Polyeder-Faltwerke (geodätische Kuppeln)	$D = 2 - 10 \text{ m}$	
1962-1972	Nach Tabelle;		Durchkreuzende Faltwerke	$D = 5 \text{ m}$	

4.3.1.4 Pilze/Schirme aus ebenen Flächen gebildet Faltwerk - Schirme					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung $g/p/q$ [kN/m ²]
1963	 Kunststoff_Überdachungen (1972), 44 Schwabe (12/1968), 868	Markthalle Epinay 144 GUP-Pyramidensegmente auf Stahlstützengerüst gesetzt, jedes Element 6x2m, 70 cm hoch, 155 kg schwer, Wanddicken 2,5 mm (Fläche), 5 mm (Rand), Flächen profiliert, Lichtdurchlässigkeit 35 %	Schirme: aus ebenen (Pyramiden-) Segmenten , innerhalb der Segmente je eine einfache Faltung (Rippe) Segmente 6x2m, 70 cm hoch Pilze 5,50 m , auf leichtem Stahlrahmen aufgelegt Stützen: Stahl	$L_x = L_y = 5,50 \text{ m}$	$g = 0,13$
1971	 Empfangsgebäude (1972), 969 Williams (1971), 261	Flughafenterminal Dubai , Arab. Emirate Arch.: Brian Broughton, Page Herst.: Mickleover Ltd., London Gesamtfläche 233 m x 116 m, 54 kleine und 56 große quadratische Polyesterpilze (19,4 x 19,4m, h = 4,50+1,50 m Rand ; kleinere Pilze: 9,70 x 9,70 m, h = 2,25+0,75 m Rand), Sandwichdicke = 58 mm	Addition von umgekehrten 4-eckigen Pyramiden , durch Reihung System gesamt ausgesteift	$L_x = L_y = 19,40 \text{ m}$	$g = 0,12$ bedeutend ist hier der LF $\Delta T = 63 \text{ K}$, $q_w = 1,25$ $w = 1,0$ kein Schnee
1980	 Langlie (3/1983), 101	Fliegende Bauten aus GF-UP-Faltwerken Ing.: C. Langlie, Wuppertal/Berlin Arch. Dipl.-Ing. Fritz Offermann Ausführung: Elsic GmbH z.B. Messe Düsseldorf, Messe Frankfurt 3 x 3 m groß 5mm dick auf Stahlrohren	Schirme aus ebenen Faltflächen, Auflagerung in den 4 Eckpunkten	3 x 3 m	$g = 0,13$ $s = 0,75$ $q_{w,D} = 0,30$


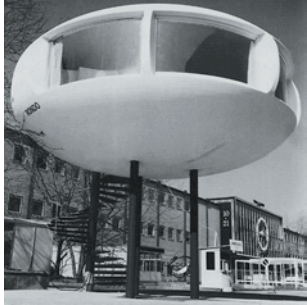
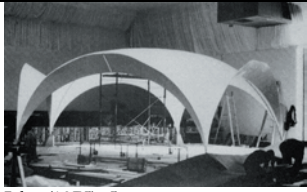


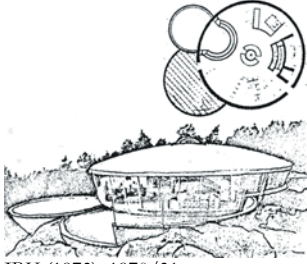
4.3.2 gekrümmte flächige Tragwerke 4.3.2.1 Einsinnig gekrümmte Schalen biegungsfrei (Kegel, Zylinder, Tonne)					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung $g/p/q$ [kN/m ²]
1966		Eisschutzzyylinder für Sendemast Botov Vrch, Bulgarien Herst.: Reinke KG Michelstadt $t = 3,5 \text{ mm}$	Zylinder mit Verstärkung durch Sicken in Ringrichtung einseitig eingespannt	$D = 6,3 \text{ m}$ oben: $D = 3,5 \text{ m}$ $H = 54 \text{ m}$	Belastung durch g , w (180 km/h), Eislast 20 cm
	Saechtling (1973), 205				
1968		Abgaskamin BASF, Ludwigshafen hergestellt im Wickelverfahren, unidirektional gewickelt+ Verstärkung durch Matten Wanddicke unten 20 mm, oben 10 mm	Zylinder mit Verstärkung durch Ringsegmente auf Stahlgerüst eingespannt einseitig eingespannt	$D \approx 2 \text{ m}$ $H = 45,5 \text{ m}$	Belastung durch g , w (150 km/h), Temp.
	Saechtling (1973), 204				
1969 01		Bamy , Schweiz Herst. Moot, Yverdon für Standort Lac de Neuchâtel, mehrm. Ausführung zylindrischer Körper in Mischbauweise, Schalenelemente, 13 m ² GFK – PUR-Schaum – GFK	Wand: Zylinder, Sandwich	$D = 4 \text{ m}$	Normalk. (Druck) aus Dach, + Wind
	IBK (1973), 69/01				
1969 02		Röhrenhaus Dutler , EFH, Schweiz Arch.: Dutler, St. Gallen, Ing.: Isler, Bern, CH Herst. Metallwerk AG, Buchs unterstützt durch: Badische Anilin- & Soda-Fabrik AG, Ludwigshafen Prototyp 70 m ² , Schalenkonstruktion im Wickelverfahren GFK – PVC-Hartschaum – GFK	Zylinderschalen mit aussteifenden Randscheiben trägt Eigenlast, Schnee und Wind, Randscheiben gestützt, innenliegender BSH-Trägerrost, der die Verkehrslasten trägt, an der Stelle der Randscheiben gestützt	$D = 5 \text{ m}$	Schale trägt bezogen auf GFL $g = 0,17$ $s = 1,00$ $w = 0,85$ Trägerrost: $g_{\text{Ausbau}} = 0,35$ $p = 2,0$
	Isler (1970)				
1970 01		Futura , NL Ferienhütte Herst. NKI, Chaam Standort: Belgien und NL Küste 45 m ² , 3,30 m hoch, mehrm. Ausführung (einige 100), Schalenkonstruktion, Halbkugel GFK – PUR-Schaum – GFK, $3,5 \text{ mm} - 40 \text{ mm} - 3,5 \text{ mm}$	oberhalb der Fenster: 12 radial angeordnete, einfach gekrümmte Schalensegmente	$D = 7,5 \text{ m}$	$g = 0,15$ DFL $g = 0,10$ GFL
	Kunststoff-Ferienhäuser (1972), 125				


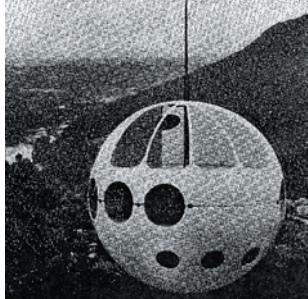
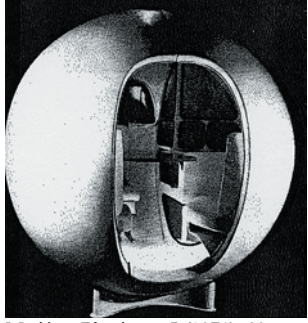

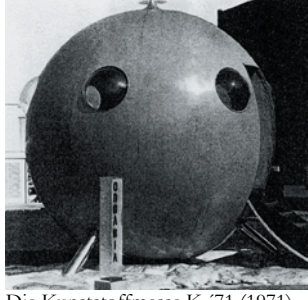
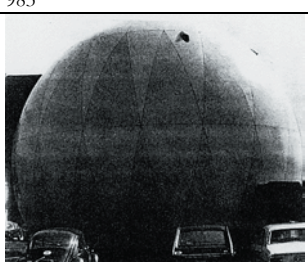
1970 02	 <p>The all-plastics (1970), 65 IBK (1973), 1970/03</p> 	Arch Domes , Ferienhäuser für USA und Alaska Herst. Arch Domes Inc., Los Altos, Kalifornien Grundeinheit mit 7 Elementen (gore), erweiterbar (extenders) GFK – PUR-Schaum – GFK	Mittelteile sind Bogenelemente Randteile sind Schalenelemente	$r = 4,65 \text{ m}$ $h = 3,35 \text{ m}$	
1970/ 71 03	 <p>Sacchtling (1973), 205</p>	Abgaskamin chemische Werke Hüls hergestellt im Handlaminierverfahren	Zylinder mit Verstärkung durch Hohlsteifen im Abstand des zweifachen Zyl.Durchmessers einseitig eingespannt	$D \approx 2\text{-}3 \text{ m}$ $H = 30 \text{ im 1. BA, } 60 \text{ m im 2. BA}$	Belastung durch g, w (150 km/h), Temp.
1971 01	 <p>Kunststoffe (12/1971), 982</p>	Informationsstand Staffelein Kunststoffverarbeitung Aus einem Endstück eines Behälters hergestellt Kunststoffmesse K 71	stehende Zylinderschale	geschätzt $D = 2 \text{ m}$	
1971 02	 <p>Ackermann (2001), 508</p>	Projekt für eine Kreiszyklinderschale Idee und Herst.: Institut für Industriebau der Bauakademie, Plastikverarbeitungswerk Staaken, VEB Sprela-Werke Spremberg	KreisZylinderschale $b = 1490$ $h_1 = 300$ $h_2 = 310$ $r = 1050$ $d = 25$ $t_1, t_2, t_4 = 1,5$ $t_3 = 2,5$ [mm]	$L = 6,0 \text{ m}$	
1972	 <p>FOMEKK (2004), Exkursion</p>	Tankstelle CF 100/200 , Finnland Arch.: Matti Suuronen Ing.: Y. Ronnka für Polykem Herst.: Fa. Polykem, Helsinki 100 m² Oberfläche	zusammengesetzt aus gleichen Schalenteilen (Ausschnitte aus Tonnenschale) = Kreuzgewölbe GFK-Sandwichkonstr.	Schalenteile B $= H = 5,80 \text{ m}$	
1976	 <p>Ackermann (2001), 510</p>	Behälter für Wasser, Säuren , DDR 500m³ - 2000m³ Speichervolumen bei 540m³, Bodenplatte 6mm dick, zylindrische Wand 7-9mm, hängende Membrandach 6mm, Mittelstütze aus Stahl	stehende Zylinderschale	$D = 14 \text{ m,}$ $H = 3,50 \text{ m}$	g + Flüssigkeitsdruck


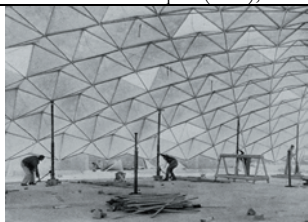





4.3.2.2 Synlastische Schalen – doppelt gleichsinnig gekrümmt - biegunsfrei (Kugel, Ellipse, Rotationsparaboloid, elliptischer Paraboloid)					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m²]
1956 01		Oberlichter Großlichtkuppel , CH Entwicklung: Heinz Isler Bauherr: Blaser Hasle-Rüegsau später Lizenz an Fa. Eschmann Thun d= 5-8 m , t = 3,5 mm einteilig bis D= 5m, darüber hinaus (wg. Strassentransport) radial geteilt bei 8 m: 8 Segmente (Schalenbau Sicli in Genf)	Kugelschale mit verstärktem Rand später Verwendung von Meridianformen anstelle von Kugelformen, also mit stärkerer Krümmung in der Nähe des Fusses	D = 5-7 m	g = 0,06
	Isler (1975), 3				
1956 02		Sandwichplatten für Kläranlagen Entwicklung: Heinz Isler max. L = 17,50 m	Gewölbeschale, Kuppelschale	L = 17,50 m	
	Isler (1984)				
1959 01		Snia Viscosa System , Italien Arch/Ing. Bertolotti, Herst.: Snia Viscosa, Mailand + Cadaut Plastic, Turin mehrm. Ausführung, für Standort Varedo n x 8 m² Grundriß Hartschaum – GFK Rahmen mit Segmentbauweise	gewölbte Sandwich-Schalen mit Randversteifung aus Stahl		
	IBK (1973), 1959/06, Schwabe (8/1969), 411				
1959 02		Expeditionshaus , Frankreich Forschungsstation Grönland Entwurf: Techn. Kommission des Syndikats für verstärkte Kunststoffe, Ing.: V. Bodanski, Ing. cecil de l'Aéronautique ATBAT – techn. Büro Herst.: Sud-Aviation-France 2 x 33 m², 2-geschossig, unten zylindrisch mit D = 6,6 m, H = 2,20 m, oben Halbkugel (h= 3,30 m), Zwischendecke mit Metallverstärkung einmalige Ausführung GFK – Hart-PVC-Schaum – GFK 3 mm – 50 mm – 3 mm	segmentierte Kugelschale (Halbkugel) auf Zylinder	D = 6,60 m	g = 0,5 GFL (0,26 DFL)
	Duflos (1961), 783 Igloo (1959), 19				
1960 01		Kunststoff-Kugelhaus IGLU- Kugelbau , BRD Konstrukteur Egon Brütsch Herst.: Jos. Schreyögg + Co. mehrmalige Ausführung 13 m² Grundfläche, d= 4 m , 8 gleiche Segmente, ohne Fundament GFK – PS-Hartschaum – Folie (außen nach innen) 250 kg, 4800 DM ohne Einrichtung, 6500 DM mit Einrichtung	segmentierte Dreiviertel- Kugelschale	D = 4 m	g = 0,20 GFL
	Ein Kunststoff-Kugelhaus (1960), 359 Schwabe (8/1969), 412				




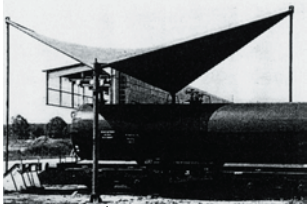
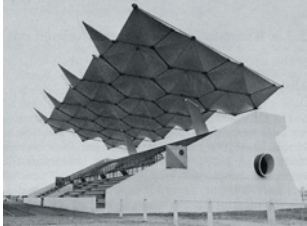
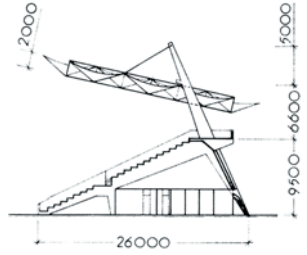
1960 02	 Ackermann, G. (2001), 505 Rühle (1970), 138	Gewächshäuser des Instituts für Gemüsebau Großbeeren, DDR Entwurf: G. Hintersdorf, I. Bernert 1,2 - 1,4 mm Materialstärke, 30 - 60 kg pro Bauteil Gesamtbreite: 12 m oder 18 m Bauteilbreite: 0,75 m, Gesamthöhe: 3,83 m Verbindung über Polyamidschrauben und Verklebung, etwa 15 Jahre genutzt Handauflegeverfahren	elliptischer Schalenbogen-träger, 0,75 m breit, doppelt gekrümmt, aussteifende Endscheiben	$L = 12 \text{ m}$ bei $h = 4 \text{ m}$ $f = 20 \text{ cm}$ $L = 18 \text{ m}$ bei $h = 6 \text{ m}$ $f = 30 \text{ cm}$	$g = 0,05$ $g = 0,06$ keine Schneelast
1960 03	 Modern Plastics (3/1961), 147	RP Dome, USA Herst. Tool Research & Engineering Corp., Beverly Hills, Californien 24,5 m Durchmesser aus ineinander verzahnten 3-dimensionalen Platten hexagonale und pentagonale Schalen verzahnen sich ohne spezielle weitere Verschlüsse	Kugelschale aus Sandwichelementen, die in sich zur Stabilisierung nochmals eine Kugelschalenwölbung sowie radiale Falten besitzen	$D = 24,5 \text{ m}$	$g = 0,10$ GFL bemessen für Wind 160 km/h $q_{w,D} = 1,25$
1963	 IBK (1973), 1963/13	Mobay Iglu, USA Einmalig ausgeführt, starrer, runder Grundriss, Sandwich GFK – PUR-Schaum – GFK	geodätisch segmentierte Kugelschale	$D = 5 \text{ m}$ geschätzt	
1964 01	 Habitations préfabriquées (1965)	Wohn Ei / Egg Houses, Schweiz Arch. Hausermann, Camoletti, Hoechel, aus Genf, Standort Hoch Savoien, Pougny bei Grilly für Vinner & Co., Paris, Frankreich runder Grundriß, Schalen zu Ellipsoid zusammengefügt, GFK – PUR-Schaum - GFK	Ellipsoidenschale mit großer Fensteröffnung	$D = 7\text{-}8 \text{ m}$ geschätzt	
1964 02	 Kunststoff-Überdachungen (1972), 42	7-up-Pavillon Expo 1964 in New York 16 verschiedenfarbige Kuppeldächer Schalen aus 4 Segmenten auf 4 Stützen, Seitenlänge je 7,5 m, Gewicht je Schale 680 Kg, Gesamtdicke 70 mm aus 2x2 mm GUP Deckschichten mit 65 mm PF-getränkten Papierwabenkern	Kugelschale aus 4 Segmenten	$D = 7,50 \text{ m}$	$g = 0,12$
1965	 www.salsburg.com/geod/monohex.html, Krause (1999)	MonoheX (Fly's Eye) Richard Buckminster Fuller Einreichung zum Patent 1961 Erste Realisation 1975 von John Warren In 3 verschied. Größen entwickelt: 12 Fuß (3,66m), 26 Fuß (7,92m) und 50 Fuß (15,24m) im Durchmesser, Schließung der runden Öffnungen durch ebene oder gekrümmte Oberlichter	segmentierte Kugelschale, die Störungen werden durch aufgewölbte Rändern und Randverstärkungen kompensiert	$D = 3,66 \text{ m}$ $D = 7,92 \text{ m}$ $D = 15,24 \text{ m}$	
1966	 Ackermann (2001)	Busbahnhofüberdachung, Gewächshäuser, DDR Bauherr: Akademie für Landwirtschaftswissenschaften 30 Jahre ausr. funktionsfähig, trotzdem 1997 abgerissen Grundrißbreite: 6,55m, Konstruktionshöhe 2,42 m, Breite: 0,75 m volle und halbe (Krag-) Bögen	elliptischer Schalenbogen-träger $t = 3\text{mm}$, doppelt gleichsinnig gekrümmt, durch Endscheiben ausgesteift ; an den Längsrändern durch Randträger versteift; Endscheiben und Randträger verbunden durch Polyamidschrauben und Kleber	$2a = 12,0 \text{ m}$ bis $18,0 \text{ m}$ (voller Bogen) bei $t = 1,2 - 5,5 \text{ mm}$ (beim Busbahnhof inf. Schneelast t verdreifacht)	$g = 0,05 / p = \text{Wind} + \text{gleichförm. Temp. änderung, Schnee nur beim Busbahnhof}$

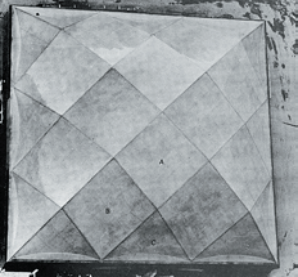
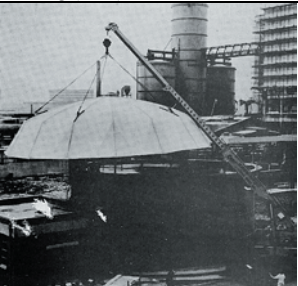



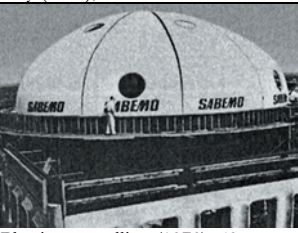
1967 01	 IBK (1973), 1967/20	Uni Dome Arch./Ing.: De Vries, Leiderdorp, NL Argeplan + Krupp Ausstellung in Wulfen, D Prototyp, 18 m ² , räumliche Elemente und Schalen GFK – PVC-Schaum - GFK	Kuppelschale mit aufgewölbtem Rand, 4 Segmente	L = 4,25 m	
1967 02	  Du Château (1972), 56	Museum zum Gedenken an die Landung der Alliierten in Sainte-Mère Eglise Frankreich Ing.: Stéphane Du Château, 20 m Hallendurchmesser, Pfeilhöhe h=4,60 m t= 6mm einschalig	vorgefertigte Kuppelschalen, erzeugt aus einer Parabel und einer Hyperbel, einschalig auf tragendem Gerüst aus Stahlrohr!! (tragend nur zwischen den Rohrrippen)	L = 3,0 m	
1967 03	 Makowski (6/1969), 224 Schwabe (12/1968), 870 Kunststoff-Überdachungen (1972), 41 Du Château (1972), 56	Markt in Argenteuil und de Fontenay aux Roses , Frankreich Ing.: Stéphane Du Château, mehrfach ausgeführt, 30 einschalige GUP-Dachschalen (mit Stahlrohrrippen unter den Stößen) 30 m Hallendurchmesser, Schalenbreite am Fuß 3m, t= 6mm einschalig Gewicht je Schalenelem. 400 kg Kosten: günstiger als vergleichbare Betonausführung	vorgefertigte Kuppelschalen, erzeugt aus einer Parabel und einer Hyperbel, einschalig auf tragendem Gerüst aus Stahlrohr!! (tragend nur zwischen den Rohrrippen) Schlankheit der GUP-Schalenteile $\lambda = 260$	L = 3,15 m	$g = 0,17$ + g Stahlrohr (GFL)
1967 04	 Kunststoff-Überdachungen (1972), 40	Schwimmbad Berchtesgaden Hersteller: Reinke KG GUP Dachschalen, Sandwichkonstruktion: 60 mm Oberschale, 2,75 mm Unterschale 4 mm, Mineralwolle	synklastische Schalen	9,1 x 3,1 m	
1968 01	 Schwabe (12/1968), 869 Kunststoff-Überdachungen (1972), 41; Du Château (1972), 56	Markthalle St. Ouen (b. Paris), F Ing./Arch.: Stephan Du Château, 18 m Durchmesser, GFK, 7 mm Wanddicke, 14 kg/m ² pro überdeckte Fläche 20 einschalige GUP-Schalen	20 vorgefertigte addierte Kuppelschalen, erzeugt aus einer Parabel und einer Hyperbel, einschalig auf radialen Beton(zug-)ring	D = 18 m	$g = 0,14$ GFL $g = 0,10$ DFL
1968 02	 Makowski (2/1971), 61	Dach über Sportstadt in Benghazi , Libyen Arch. Munce und Kennedy Herst. Mickleover Transport Co. Ltd. London ca. 500 selbsttragende GFK-Sandwichplatten auf Aluminiumträgern D = 68 m	tragendes Aluminiumrohr mit GUP-Platten belegt	L _{max} = 10 m	$g = 0,55$ GFL


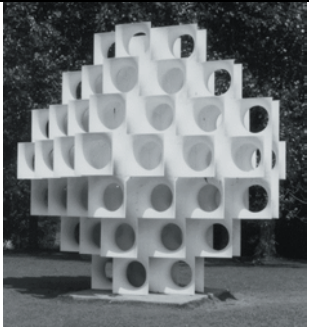
1968 03	 Home (2002) Voigt/Genzel/Siponen/Suuronen (02.06.2004)	Futuro Apré Ski-Hütte, FIN Arch.: Matti Suuronen Ing.: Yrjö Ronkka Herst. Oy Polykem AB, Helsinki D = 8m, 50 m ² , mehrm. Ausführung GFK – PUR-Schaum – GFK, Fenster PMMA 16 Einzelsegmente bilden Ellipsoid, lagert auf Stahlring, Falltreppe als Eingang inklusive Möblierung als Ferienhaus angeboten Gewicht: 3000 kg	Ellipsoidenschale (Rotationsellipsoid) auf Stahlring	D = 7,80 m	$g_0 = 0,09$ $g_A = 0,96$ $p = 2,00$ $s = 2,00$ $q_{w,D} = 1,0$
1969 01	 Genzel/Walter (10.03.2004) Vorstatik Rondo (o. Datum) Rondo – Statik (1971)	Rondo, Wochenendhaus Arch.: Casoni & Casoni, CH Ing.: rene Walter, CH Herst.: Horlacher AG, 5-malige Ausführung 7,8 m Durchmesser; h außen = 3,8 m, h innen = 3,2 m 50 m ² , Schalenkonstruktion, Gesamtkörper GFK – PUR-Schaum – GFK, Stahlskelett im Boden, auf Stahlstützen stehend Als komplette Einheit auf Fundamentsäulen gesetzt, Gewicht ca. 4500 kg	obere und untere Hälften : annähernd Kugelkalotten beim Prototyp ungeteilt, später aus 8 Segmenten	D = 7,68 m für obere und untere Kugelschale	$g_0 = 0,15$ $s = 5,0$
1969 02	 Isler (1975), 5 Isler (1968), 200	Ausstellungs-Pavillon für ein Gartencenter (Claude SA, Brétigny), Frankreich Arch., Ing., Entw.: Heinz Isler doppelt gekrümmte 10 Schalensegmente GFK verkleinerte Nachbildung der Betonschale des Wyss Gartencenters in Solothurn von 1962	Freiform (im Mittelteil ein Ausschnitt aus einer Rotationsform mit willkürlich gewählter Meridiankurve) mit aufgewölbten Rand, aus 4 Segmenten	L = 10 m geschätzt	
1970 01	 IBK (1973), 1970/27	Samoa II, Frankreich Herst.: Stratiforme, Bersee, Nord Standorte Werksgebiete und schweizer Alpen mehrm. Ausführung, runde Mischkonstruktion, 28 m ² Schalenelemente, GFK – Glaswolle – GFK	Dach Kugelschale	Dach D = 6 m	
1970 02	 IBK (1973), 1970/29 This all-plastic houses (1970), 66	Space Shell, USA Herst.: Space Shell Inc., Oakland, Californien mehrm. Ausführung, runder Grundriß, 115 m ² Schalenkonstruktion aus Einzelschalen GFK – Schaum – GFK + PVF-Film 18 identische Dach- und Wandelem.	18 identische Kuppelschalensegmente Stich 1ft (0,35 cm),	D = 13 m	
1970 03	 IBK (1973), 1970/31	Torö Haus, Schweden Arch.: Berglund + Rand Standort: Insel Torö bei Stockholm einm. Ausführung Überdachung eines runden Gebäudes, ca. 15 m ² GFK – PVC-Hartschaum – GFK, Oberlicht PMMA	Dach Kugelschale	D = 4,3 m	

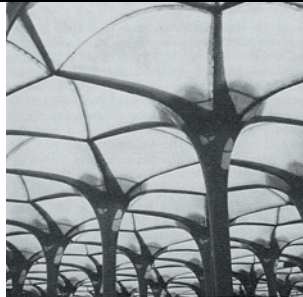
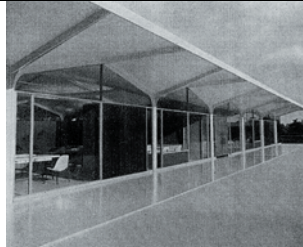


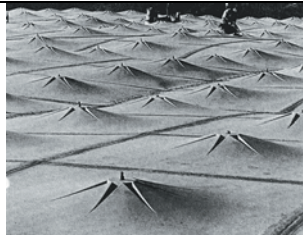
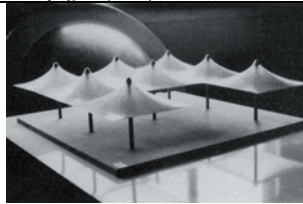
1971 01	 Polónyi (2003), 231	Pavillons für deutsche Industrieausstellung in Brasilien, Arch.: Georg Lippsmeier Ing. Polonyi, von Kalmar Herst.: ISOLAG Mölln Rippenkuppeln mit versch. D: D = 6,3 m; 12,6 m; 19 m t = 4,5 – 5 mm GFK	Rippenkuppel (verst. Kugelschale) Rippen in Richtung der Meridiane (Haupttragrichtung) Verbindungs/Versteifungsflansche h/t = 100/15 mm	D = 6,3 –19 m	g + antimetr. w
1971 02	 Matières Plastiques 5 (1971), 37	R. F. A. Maison „Sphere“ Arch. : Roland R. Hanselmann Mehrstöckiges Kugelhaus	2 halbe Kugelschalen ergeben geschlossene Kugelschale, Stützung geht als Nadel durch die Kugel	D = 9 m geschätzt	
1971 03	 Matières Plastiques 5 (1971), 39	« Sphere d'isolement » Clude Vidili	Vollkugelschale mit ovaler Öffnung	D = 1,85 m	
1971 04	 Makowski (2/1971), 61	Sheikha Badrieh Moschee, Kuwait Herst. Middle East Reinforced Plastic Industry, Beirut, Libanon 191 E Polyesterharz von Scott Bader Co. Ltd. GFK-Überdachung einlagig 17,10 m Durchmesser, 4 m Höhe	Kugelschale aus 8 identischen Segmenten	D = 17,10 m	
1971 05	 Die Kunststoffmesse K '71 (1971), 983	Organia Ferienhaus, Österreich Herst.: Organia Kunststoffe, Wien 12 m² Wohnfläche und Duschraum im Untergeschoß aus 12 Segmenten zusammengesetzt Kunststoffmesse K 71	Vollkugelschale aus 12 Segmenten, 4-mal punktgestützt	D = 3,9 m	
1971 06	 Polónyi (2003), 233	Ausstellungspavillon der Reichhold-Albert Chemie, BRD auf der K'71 in Düsseldorf Herst.: ISOLAG Mölln Ing.: Polonyi aus sphärischen Dreiecken zusammengesetzte Kugelschale, auf Kugellinnenseite über Flansche verschraubt, gelb 2 mm GUP- 10 mm PUR – 2 mm GUP	Voll-Kugelschale Probebelastung mit Z = 10 kN radial am Äquator, dabei Verformung am Scheitel f = 6 mm	D = 13 m	

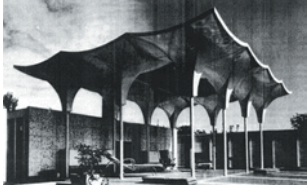
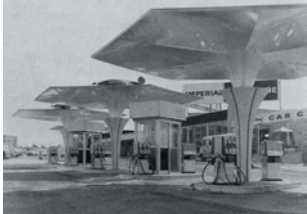
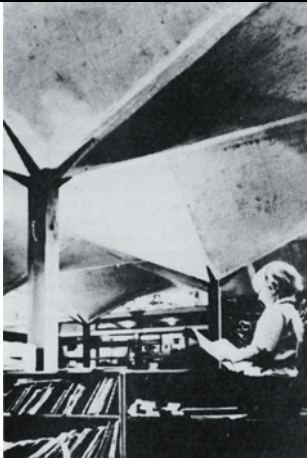



4.3.2.3 Antiklastische Schalen doppelt gegensinnig gekrümmt - biegungsfrei Sattelschalen (hyperbolische Paraboloid, Rotationsparaboloid, Conoid)					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1957		Überdachung für Mailänder Triennale Arch: Roberto Menghi Ing: Egone Cegnär Herst: Pirelli	addierbare Schalenkonstruktion, aus insg. 8 Hyparschalenelementen transluzente GFK-Konstruktion mit Honeycomb-Papier	ca. 10 m von Fußpunkt zu Fußpunkt	
	Les Matières Plastiques (1959), 114				
1959		Dach in Texas, USA, Fort Worth Entwurf: William R. Orr gestest an der University of Surrey (GB) durch Makowski selbsttragende gefaltete GFK-Elemente Firma Structural Plastics Ltd	durch Aluminiumkanten versteiftes Tonnengewölbe aus hyperbolischen GFK-Paraboloiden 1,20 x 1,20 m außenliegendes, diagonal angeordnetes Stahlrohr-Gitter	L = 13 m geschätzt	
	Makowski (6/1969), 224 Quarmby (1974), 71 les matieres plastiques (1959), 113				
					
1960		Early single-skin scalloped dome Fort Worth, Texas (USA) William R. Orr Die Schalen tragen einen 2-Tonnen-Kran im Inneren des Baus	Schale aus 15 identischen, radial angeordneten hyperbolischen Segmenten auf runden Grundriss	D = 20 m geschätzt	
	Quarmby (1974), 64				
1964		Dach eines Marktes bei Lezoux Entwurf: Yves Chaperot 6 HP-Schalen 7x4 m entlang der Diagonale, 2 m hoch, ergeben eine Einheit. 20 solcher Einheiten + Verbindung an den Hochpunkten ergeben das Dach	Addition von Hyparschalenelementen (Polycorolles) deren Hochpunkte durch Stahlstäbe verbunden sind	L = 20 m geschätzt	
	Quarmby (1974), 70 Zerning (1975), 2				
1966		Handelsmesse Bangkok, Pavillon Hyperbolische Paraboloid mit steilen Giebel und ausladenden Sonnendächern Zerlegbare Halle, mattenverstärkte GUP-Sektionen t = 2,5 mm, hoch lichtdurchlässig, stählerne Randträger	Hyparschale aus 2,75 m langen hyperbolischen Segmenten, an den Kanten durch 50 mm hohe Rippen versteift	L = 11 m	g = 0,55
	Sachting (1973), 478				
1968		Schwimmbadüberdachung, GB in Lincoln Design: John West, R. Bouverie Herst.: Scott Bader aus HP-Segmenten 9,75x2,15 m 30 m x 15 m, Höhe 5,4 m 2,4 mm Crystic-348-Polyesterharz, Randstege t = 7,2 mm, d = 7,6 cm und 2-Lagen Glasfaser transluzent hellblau eingefärbt	Addition von einschaligen hyperbolischen Paraboloiden aus GFK t = 2,4 mm, untereinander und mit Betonfundament verschraubt,	l = 15 m	
	Sachting (1973), 504 Zerning (1975), 57				




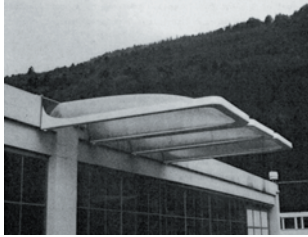
1969 01	 Zerning (1975), 55	Schwimmbadüberdachung, GB in Aberdeen Design: John West, R. Bouverie Herst.: Scott Bader HP-Segmente: 3,96 x 1,29 m Halle 15 m x 7,6 m, Höhe 5,4 m 1,6 mm Polyesterharz, Randstege $t = 4,8$ mm, $d = 1,27$ cm überlappend	Addition von einschaligen hyperbolische Paraboloiden aus	$l = 7,6$ m	
1969 02	 Saechtling (1973), 504 Hintersdorf (1972), 30	Schwimmhalle in Aberdeen, Schottland, GB Entwicklg.: Reuben Bouverie für Scott Bader mehrf. Ausführung transluzent aus 50 identischen HP-Segmenten, Gesamtgröße: 15,24 m x 7,62 m, Höhe 3,96 m Segmentgröße: 3,96 m x 1,29 m 1,6 mm GFK, 4,8 mm Stärke an Verbindung	Addition von 50 einschaligen GFK- Hypars , durch Winkleisen randverstärkt	$L = 7,60$ m	
1969 03	 IKA '71 (1971), 17	Diamant 4, Ferienhaus, Belgien Arch.: F. Deryck Herst.: PRB SA, Brüssel mehrm. Ausführung, quadr. Grundriß 16 m ² , addierbar GFK - PUR-Hartschaum – GFK, innere Verkleidung PUR- Hartschaum-Spritzisolierung, Holzboden 3 verschd. Typen Diamant 4 = 16 m ² (4 eckig) Diamant 6 = 42 m ² (6 eckig) Diamant 7 = 63 m ² (7 eckig)	Hyperbolische Paraboloid- Dachschalen in Sandwichkonstruktion		
1969 04	 Polónyi (14/1969), 22 Saechtling (1973), 207 Rühle (1970), 142	Überdachung einer Abfüllstation der Bayerwerke Leverkusen, BRD Arch. Schneider-Wessling Ing.: Polónyi Grundriß 10 x 10 m, Dicke 3 mm Stahlrohre Torkretspritzverfahren 20 % Glasfaseranteil	Hyperbolische Paraboloidschale $t = 3$ mm , mit Randverstärkung (Stahlrohr $d = 133 \times 9$ mm) Membranspannungen aus g+s betragen nur 0,24 kN/cm ²	$L = 10$ m	$g = 0,054$
1969 05	 Saechtling (1973), 518 Zerning (1975), 59 Du Château (1972), 58 	Tribüne des städtischen Stadions Laval Frankreich Arch.: Jean Saint-Arroman Beratender Ing.: S. Du Château Polycorolles Körper: Yves Chaperot Herst.: Dubignon-Normandie Polycorolles heißen die Hyperelementen aus GFP ($t = 3$ mm), aus denen unterschiedliche Tragwerke z.B. Verbund-Dächer, immer in Kombination mit Stahlrohren oder Abhängungen entstehen 5 kg/m ² GFK Tribüne Stadion in Laval: 79 Polycorolles-Schalen, 1100 m ² Gesamtfläche, $L = 52,5$ m,	obere Trägerkonstr.: Stahlrohr Dreiecksnetz untere Trägerkonstr.: Stahlrohr Sechsecknetz darin eingehängt Fläche aus Polycorolles = hyperbolische Paraboloiden mit Grundform des Rhombus mit Winkeln von 60° und 120°, Rhombus 7 m lang und 4 m breit, Krümmung 2 m bis zu den Spitzen Auskrägung am Dachrand durch Zugstangen aufgehangen	$l_{\max, x} = 28$ m $l_{\text{krag}} = 10,50$ m	

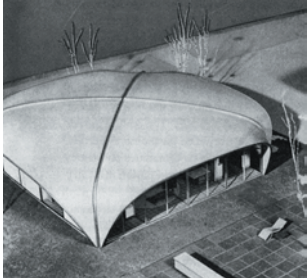
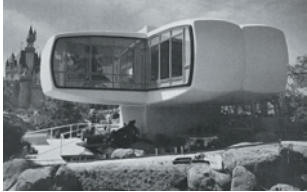
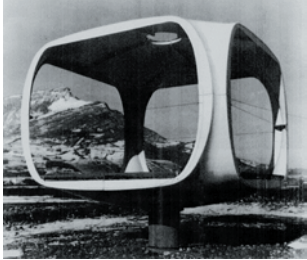
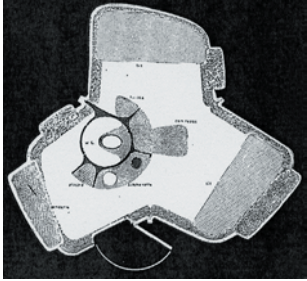

1969 06	 Zerning (1975), 56	transluzente Überdachung für Einkaufskomplex, Dundee, Schottland, GB Design: Reuben Bouverie 13,4 m x 13,4 m, Höhe 3,9 m verschied. Segmente t = 2,4 GFK Verbindung der Elemente über Flansche h = 76 mm, t = 7,2 mm, am Flansch Stahlplatte t = 6,4 mm	Hyparschale aus 3 versch. hyperbolischen Segmenten auf quadr. GR (A 3,96 m x 3,96 m; B 4,87 x 3,96; C halbes Element B)	L = 13,4 m	g = 0,4 DFL 0,05 GFL
1969 07	 Zerning (1975), 56	Kuppel über Wassertank, GB Manchester Design: Ruben Bouverie Herstellung: Scott Bader 15 opake hyperbolische Paraboloidschalen-Segmente Dachdurchmesser: 13,334 m Höhe: 3,048 m Länge und Weite Segment: 7,01 m x 2,819 m GFK, ca. 3,2 mm stark, Verbindungsflansch h = 76 mm, t = 9,6 mm Leicht grau, durchsichtig	Hyparschale aus 15 identischen, radial angeordneten hyperbolischen Segmenten auf runden GR	D = 13,3 m	g = 0,058 DFL = 0,08 GFL
1970 01	 these all-plastics houses (1970), 64	Franchise Units, Canada, Mexiko, USA Kalikosima Houses Arch. Juan Jose Diaz Infante, Mexiko Herst. Franchise Units Inc., New York & Miami mehrm. Ausführung, tunnelförmige Räume (doppelt gekrümmte Schalen) um 6-eckiges Zentrum, 6 m Durchmesser insg. 120 m² Grundfläche 1,5 mm GFK – 75 mm PUR-Schaum – 1,5 mm GFK im sprayup Verfahren hergestellt	6 radial angeordnete Hyparschalen, bestehend aus je 3 Segmenten	je Schale L = 3 m bei H = 3,5 m	g = 0,09 DFL
1970 02	 Monnier (2002)	Tournesol Schwimmhalle, Frankreich, Prototyp in Nangis (Seine et Marne); Roissy-en-Brie bei Paris; Muret; Douvrin) Arch.: Bernhard Schoeller Ing.: themis Constantinidis; GFK-Elemente: société Matra Herst.: CERER Paris, vertreten durch: Kuhlmann Deutschland GmbH D = 34 m, 36 Schalenteile	Rippenkuppel, Rippen: Stahl-Fachwerkträger-Bögen doppelagig; Flächen: GUP Sandwich-elemente in Hyparschalenform	Schalenelemente max L = 2,90 m	
1972 01	 Doernach (1974), 42 Gay (1972), 54	Oegema, NL Architekt: Oegema	Rippenkuppel, Flächen in Hyparschalenform Evtl. Rippen Stahlträger	Schalenelemente geschätzt L = 2,50 m	
1972 02	 Plastics are rolling (1972), 63	Sabemo Dome, Australien Dom auf dem Hochhaus der Firma Sabemo, ca. 60 m üN. Überdachung der technischen Ausrüstung des Hochhauses, D = 18,3 m, 8,2 m hoch aus 12 Teilen zusammengesetzt, GFK mit Escon isophthalic-type Polyesterharz, Polyurethanschaum, 8,6 cm dick sprayup Technik	Schale aus 15 identischen, radial angeordneten hyperbolischen Segmenten auf runden GR	D = 18,3 m bei H = 8,2 m	Windstärke 240 km/h, d.h. q winddruck = 2,80



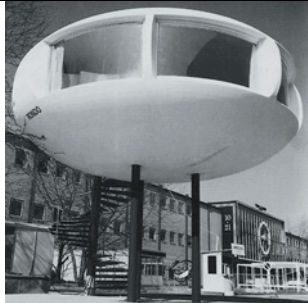


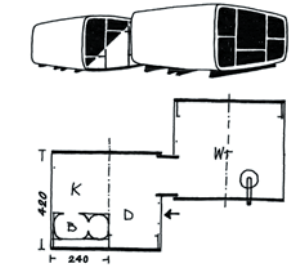

1973	 <p>Marten (1973), 74</p>	<p>ISV-Kunststoffstall, Ungarn Fertigbausystem für Schweinehaltung Entw.: ISV-Panelüzem, Gyál selbsttragende Schalenbauteile $b = 1,20$ m als Wand und Dach</p> <p>2 mm GFK - 40 mm Polyurethan - 3 mm GFK (innen nach außen) größter Stall mit 72 m Länge, sonst zw. 36 m - 54 m, Verwendung auch als Turn- und Kleinschwimmhalle in Wohnsiedlungen jährliche Produktion von 10 000 Elementen, mehrmalige Ausführung</p>	Lineare Addition von Hyparschalenelementen	$D=L = 12$ m	$g = 0,09$ GFL $g = 0,06$ DFL $s = 1,80$
1974	 <p>Isler (1975), 5</p>	<p>Kletterplastik, Schweiz aus vorgefertigten hyperbolischen Elementen Entwicklung: Heinz Isler 5 x 5 x 5 m GUP mit Mikrobüllfüllung</p>	Addition von Hypar-Elementen	$H = 5$ m	


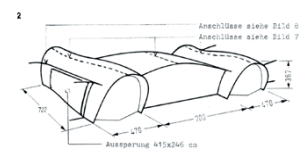
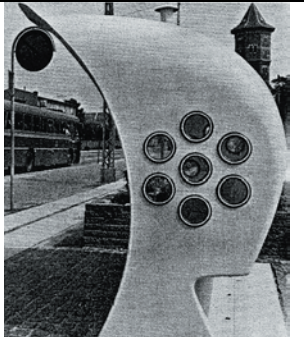

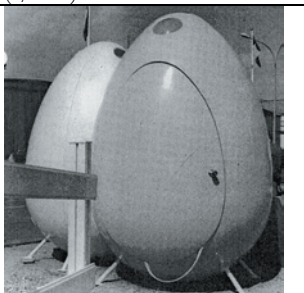
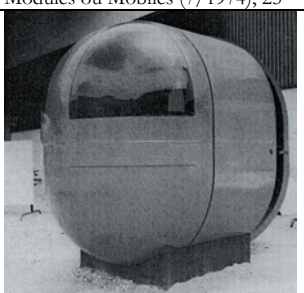
4.3.2.4 Schirme aus gekrümmten (Schalen-) flächen					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1959 01	 Saechtling (1973), 476	amerikanischer Ausstellungspavillon im Sokolniki-Park Moskau Pavillons aus 20, 47 und 23 lilienförmigen Schirmkonstruktionen (Hyparflächen) aus GFK 4,50 x 4,50 m H = 6 m, 1500 m ² 1,5 mm dickes GFK, 54 \$ pro m ² (ca. 4 Lagen 300g Roving-Gewebe), Arch.: George Nelson, Ing.: Albert Dietz Owens-Corning Fiberglass Corporation, Fa. Lunn Laminates, Huntington, Long Island, USA nach der Ausstellung in Yalta (Krim, Ukraine) wieder errichtet, einige haben bis heute überdauert (2004)	Schirme: 6 Segmente doppelter gleichsinniger Krümmung mit angeformten Verbindungsflanschen, D = 5 m, t = 1,5 mm Fuß: Rotationsparaboloid H = 6 m t = 6mm	D = 6 m	g = 0,030 Windstärke 100 km/h q _{w,D} = 1,15 für keine weiteren Lasten bemessen
1959 02	 Gigliotti u.a. (10/1961), 384	Elementary School (Volksschule), USA Unterstützt vom MIT Arch.: Marvin Goody, F.J. Heger, C.Y. Yang, J. Schiffer Ing.: L. Contini, D. Mahaney, R. Whittier, M. Gigliotti GFK Schirme, hyperbolische Paraboloid	Schirme: aus 4 HP-Elementen der Seitenlänge 2,60 m; durch Stahlrahmen stabilisiert Stützen: Stahl H = 2,10 m	D = 5,2 m	g = 0,18
1961	 Kunststoff_Überdachungen (1972), 44 Structures en coquilles (1969), 14	Marktüberdeckung in Fresnes , Frankreich geschlossenes Dachgebilde, Schirme aus 5 Teilen, Stützen und den 4 Segmenten des Schirmes, teilweise transluzent	Schirme aus 4 HP-Elementen auf konischer GUP-Stütze H = 3,20 m	D = 5 m geschätzt	g = 0,10
1964	 Kunststoff_Überdachungen (1972), 44	Ausstellungs Schirmkonstruktion "Les échanges" Expo '64 Ing.: Heinz Hossdorf vorgespannte GFK-Hyparflächen + Stahlverbund Elemente 18 x 18 m	siehe zugbeanpruchte Konstruktionen	L _x = L _y = 18 m	g = 0,030 DFL = 0,055 GFL
1966	 Compagno (1991), 60	Dachkonstruktion in Genua , Italien Arch.: Renzo Piano Herst.: E. Piano Bauunternehm. vorgespannte GFK-Stahlkabelsystem 60 m x 40 m, Module von 10 m x 10 m, Hohlkammer Sandwich GFK 2,5 mm außen, 1,5 mm innen	siehe zugbeanpruchte Konstruktionen	L _x = L _y = 10 m	g = 0,09
1968 01	 Isler (1975), 8	Projekt für Markthallenüberdachung Neuenburg , Schweiz Entwicklung: Heinz Isler GUP-Schirme 12 x 12 m	Schirme , deren doppelt gekrümmte Form entsteht, wenn ein Stempel in die Mitte einer quadrat. Membran eingedrückt wird Schirmhöhe ≅ halbe Spannweite	L _x = L _y = 12 m	


1968 02	 Structures en coquilles (1969), 17	Pavillon in Vancouver, Kanada	Schirme aus HP-Elementen Schirmhöhe \cong halbe Spannweite Stütze $H \cong 2,0$ m, wahrscheinlich Stahl	$L_x, L_y = 2$ m geschätzt	
1969	 Schwabe (1975), 502	Kanadische Tankstelle, Kanada für Imperial Oil Co. Standort: Toronto, Windsor, Halifax, Hull, Quebec Überdachung aus Hypar-Schirmdächern sechseckige Konstruktion mit 9 m Durchmesser aus identischen GFK-Elementen, verschraubt	sechseckige Hyparschale aus 6 identischen Segmenten, verschraubt	$D = 9$ m	
1970 01	 Zerning (1975), 55	Dach einer Grundschule, London, GB Entwicklung: David Harris, Mike Kenninger (Studenten der Architectural Association) Ing.: Gerry Rumens Sandwich-Schirme, 4mm – 12mm – 4mm ca. 6,5 m x 5,4 m je Schirm	6 Schirme aus HP-Elementen Schirmhöhe 4 m Stütze $H = 26$ m	6,5 x 5,4 m	$g = 0,15$
1970 02	 Zerning (1975), 57	Überdachung für Fina Petrol Station, Frankreich Morainvilliers Entwicklung: Guillaume Gillet 30 Schirme auf Stahlstützen, 690 m ² 7,2 m x 4,15 m x 1,8 m Segmentabmessung, 5 mm GFK	30 Schirme aus HP-Elementen Schirmhöhe 1,80 m Randträger Stahlrohr 76x3,25 mm Verbindungen der HP-Elemente mit jeweils 4 Klammern Stütze Stahlrohr Stahlrohr 220x20 mm	7,2 m x 4,15 m	$g = 0,09$
1970 03	 Zerning (1975), 58 Makowski (2/1969), 10 Compagno (1991), 80	Pavillon der italienischen Industrie für EXPO Osaka, Japan Arch.: Renzo Piano Ing.: SERTEC Ingeniering Herst.: E. Piano Bauunternehm. für Weltausstellung, 30 m x 38 m Fläche GUP Wandsegmente 6 m x 8,5 m, auf Baustelle aus 4 Teilen zu formstEIFen, dreidimensionalen Körpern zusammengesetzt, diese mit vorgespannten Kabeln, die an Seitenstützen verankert sind, verbunden Hohlkammer-Sandwich 4mm – 2 bis 6 cm – 4mm (6 mm an der Spitze)	siehe zugbeanspruchte Konstruktionen	$L = 17$ m (Elemente 8,5 m x 8,5 m)	$g = 0,15$
1972	 plasticconstruction (4/1972), 187	Vorgefertigte GUP Tankstellen Djem International, Braibant, Belgien, für GB Super Bazars 4 bis 6 Überdachungen, GUP Formstücke Dicke 5mm, GUP Tragsäulen 7x3,4 m, 3,3 m Gesamthöhe, Stahlverankerung	Hyparschalen auf Stützen aus hohlem GUP $H = 3,30$ m	7 m x 3,4 m	$g = 0,50$ (inkl. Randverst. Stahl)

4.3.2.5 Freiformen-Schalen – biegungsfrei doppelt gekrümmt					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1956	 Isler (1975), 4	Klimakammern der Schweizer Armee, CH Entwicklung: Heinz Isler Herst.: Hartmann Fehrltdorf doppelt gekrümmte Schalen aus GFK L = 6-9 m, t = 1,5 mm Spritzverfahren, extrem leicht für Montage per Hand	Gewölbeschale, Kuppelschale nach Abnahme der Form von einer Sandform Optimierung durch Verbesserung der Krümmungsradien, besonders am Fuß	L = 6 m	g = 0,027
1967	 Compagno (1991), 17 und 66	Konstruktionssystem einer Schale für die XIV Triennale in Mailand (I) Arch. Renzo Piano, F. Marano, O. Celadon, G. Fascioli Pavillon, Herstellung in industrialisiertem Produktionsprozeß - freie Schalungsform, Prototyp war Kuppelschale einzelne Sandwich-Paneele 2 m x 2 m, 10 cm dick Elemente wurden verklebt Faserharzspritzverfahren	kleinteilige vorfabrizierte Schalenelemente über freiem Grundriss, vor Ort zusammengeklebt, freie Schalenform experimentell ermittelt an maßstäblichen Modellen	D > 6 m geschätzt	
1969 02	 Isler (1975), 8	Projekt für einen Dom Entwicklung: Heinz Isler D = 30 m GUP	Addition von Schirmen, deren doppelt gekrümmte Form entsteht, wenn ein Stempel in die Mitte eines Quadrats eingedrückt wird Kuppel sollte ohne Stahlverstärkungen gebaut werden	D = 30 m	
1985	 Heinz Isler: Newer Structure in Plastic Materials, Eigenverlag: 1997, S. 2.2.118	Transparentes Vordach , Schweiz Entwicklung: Heinz Isler inkl. Rinne, 4 m auskragend GUP	Freiform, etwa halbe Kissenform ein Segment	L = 4 m	

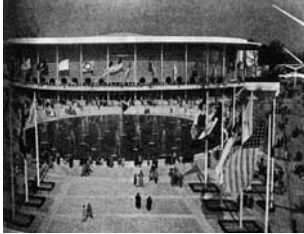

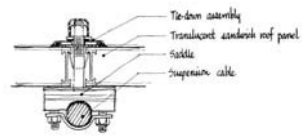

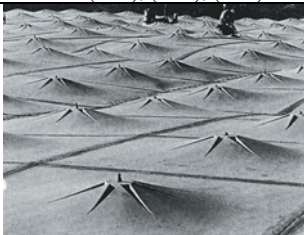

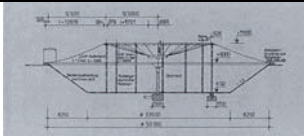
4.3.2.6 Biegebeanspruchte Schalen mit deutlichen Randstörungen					
Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1954		Projekt Wonder House, USA Modell für General Electric von Industriedesigner Eliot Noyes	schalenförmige Sandwichelemente über quadr. Grundriss	L = 16 m geschätzt	
	Dietz - Better Buildings (1955), 85				
1957		Monsanto House of the Future USA, Disneyland Arch.: (R.W. Hamilton, M.Goody) und Ingenieure des Massachusetts- Institute of Technology (Dietz, McGarry, Heger) als Forschungsprojekt, Ausstellung Herst.: Monsanto Chemical Comp., Springfield Abbruch 1967 Wohnhaus aus vorgefertigten, Schalen-Elementen doppeltes Sandwich (Hohlkasten) Hohlkasten Boden: unteres und oberes Sandwich GFK- PUR-GFK (mm) 7,5 - 75 Papierwabe - 7,5 Hohlkasten Decke: unteres und oberes Sandwich GFK- PUR-GFK (mm) 7,5 - 100 Papierwabe - 7,5	an einem Betonkern hängen sternförmig 8 schalenförmige Sandwichelemente (Flügel genannt) Boden und Dach sind Kastenträger(doppeltes Sandwich) Biegebeanspruchung Max M = 42 kNm	L _{Krag} = 4,88 m H= 4,0 m	g = 0,50 p = 2,5 s = 1,95 w _D = 1,22 (Winddr. enthält Korrektur wg. Erd- bebenlast)
	Dietz - Final Report (1957) Dietz - Part 1, Part 2 (1957)				
1964		Chanéac Raumzelle, Frankreich Arch./Ing. Chanéac, J. Nicoulaud Standort: Saint-Pierre-d'Albigny Prototyp, Schalenkonstruktion Kombinierbares Element mit diversen seitl. Abschlüssen	schalenförmige Raumeinheit auf radialem Stahlkranz gelagert	4,20 × 4,20 × 3,0 m	
	Oui à l'architecture (1968), 17				
1966		Bulle Trois Coques (minibulle), Frankreich Arch.: Jean Maneval, F Herst. Bati-Plastique und Dubigon, Normandie Polyeder mit 3-eckiger Flächenform, Zellen als räumliche Elemente in GFK – PUR-Schaum – GKF	Vorläufer/ Studie zum Bulle Six Coque 1967, siehe dort	D = 2,25 m	
	l'architecture d'aujourd'hui Nr. 131 (1967), 90				
1967 01		Sparoid, Belgien Spheroid Entwerfer: Guy de Moreau 80 m ² Kugelhaus Raumzelle aus 7 Elementen	schalenförmige Sandwichelemente über rundem Grundriss	D = 11 m	
	Quarmby (1974), 125				

1967 02	 Bancilhon (2003) Knitz Archivmaterial (2004) Ganz-Plastik Haus (1957)	Six Shell Bubble House / Bulles Six Coques / Alco Orion , Frankreich für Feriendorf in Pyrenäen, Arch.: J. Maneval, Ifert + Meyer Herst.: Alco; Bati-Plastique, Dubigeon, Normandie Frankreich, mehrm. Ausführung 6-Raumteile sternförmig um Mittelteil gruppiert 32 m ² , ca. 2000 kg Faser- Spritzverfahren, räumliche Elemente gefügt, geschraubt GFK – PUR-Schaum – GFK an	6 sternförmig angeordnete schalenförmige Sandwichelemente (Flügel) auf radialen Stahlträgerrost aufgelagert	D = 8 m	
1967 03	 l'architecture d'aujourd'hui (131/1967), 88	club de jeunes S.E.R.A. , Frankreich Architekt: Gérard Grandval vorfabrizierte reihbare Sandwichelemente GFK-Außenschichten und Dämmung 1,0 m Breite, 8,0 m Länge, als Dach und Boden einsetzbar, dazwischen die Belichtung	schalenförmiges Sandwich als Boden und Dach	L = 8 m	
1969 01	 Genzel/Walther (10.03.2004) Vorstatik Rondo (o. Datum) Rondo – Statik (1971)	Rondo , Wochenendhaus Arch.: Casoni & Casoni, CH Ing.: René Walther, CH Herst.: Horlacher AG, 5-malige Ausführung 7,8 m Durchmesser; h außen = 3,8 m, h innen = 3,2 m 50 m ² , Schalenkonstruktion, Gesamtkörper GFK – PUR-Schaum – GFK, Stahlskelett im Boden, auf Stahlstützen stehend Als komplette Einheit auf Fundamentsäulen gesetzt, Gewicht ca. 4500 kg	obere und untere Hälften : annähernd Kugelkalotten, Zwischenstück schalenförmige, vornehmlich auf Druck und Biegung beanspruchte Konstruktion	D = 7,68 m für obere und untere Kugelschale	g ₀ = 0,15 s = 5,0
1969 02	 Venturo CF 45 Prospekt	CF 45, Venturo , FIN system Arch.: Matti Suuronen, Herst.: Polykem AB, Helsinki B = 2,3 m, H = 2,7 m, L = 6,9 m 45 m ² , Mischbauweise von räuml. Elementen, GFK- PUR-Schaum – GFK	schalenförmige Sandwichelemente über quadr. Grundriss	6,90 × 6,90 × 2,30 m	
1969 03	 Saechtling (1973), 513	Transstar Villa , Ferienhaus, Australien Herst. Transstar Villa Pty. Ltd. 39 m ² , 4,27 m x 9,14 m 4-eckige Schalenkonstruktion, im Wickelverfahren hergestellt GFK – PUR-Schaum – GFK	schalenförmige Sandwichelemente über rechteckigen Grundriss	4,27 x 9,14 m	
1969 04	 Schwabe (8/1969), 413	Tub Co. Prof. Patfoort, Thiry et Cie, Ets Louis Julien, Gent Wickelverfahren, Außenschalen 40 mm, Wohnzelle, 10 m ² GUP-Außenhaut – PVC-Schläuche – GUP-Innenhaut Kühlwasserzirkulation innerhalb der Schläuche mgl.	schalenförmige Sandwichelemente über quadr. Grundriss	4,2 x 4,2 m	
1971	 Hausermann (1971), 82	Les Domobiles Arch.: P. Hausermann, P. le Merdy 7,50 m x 3,50 m große Blasen, Raumzellen GFK-Sandwich und Acrylfenster	schalenähnliche Konstruktion	L _{max} = 3,50 m	

1972	  IBK (1973), 972/03 Langlie (1976), 125 ausführliche stat. Berechnung	Gemini Bungalow , NL Herst. Le Comte-Holland N.V., Vianen, NL Entwurf und Prototyp stammt von Concept International Enterprises Ltd., Canada von 1964 Schale, Grundrißvarianten 90 m ² GFK – PUR-Schaum – GFK, $t = 5 + 80 + 5 = 90$ mm hölzerne Randversteifung der Schalen Musterhaus der Firma Suhrborg & Co. GmbH (1972) in Wesel-Bislich	Berechnung aufgrund geringer Krümmung der Mittelfläche nicht als Schale, sondern als Dreigelenkbogen, mit einer dazwischenliegenden Platte, prinzipiell sind Seitenteile doppelt krumme Schalen	„Seitenteile“ = Dreigelenk- rahmen $l_{\max} = 4,70$ m, $h_{\max} = 3,67$ m „Mittelteile“ = Platte $l_{\max} = 7,00$ m	$g = 0,22$ $s = 0,75$ $q = 0,97$
1974 01	 plasticonstruction (6/1974), 320	Sitzhaus Architekt: Poul Cadovius Dänemark Herstellung: Cadomus A. S., Horsesholm, Kopenhagen GFK	schalenförmige Konstruktion	$H = 2,10$ m $B = 3,20$ m	
1974 02	 Architektur und Wohnwelt, (6/1974) S. 418	Keraplay Kletterkuppel Spielgeräte aus GFK, Herstellung: Keramchemie, Siershahn	Ausschnitt Kuppelschale	$L = 5$ m geschätzt	
1974 03	 Modules ou Mobiles (7/1974), 25	Strandkabine , Frankreich für Vertrieb Dorestyl bei Joinville le pont ausgestellt auf der Europlastique 74, Frankreich	schalenförmige Konstruktion	$L \cong 2$ m	
1974 04	 Modules ou Mobiles (7/1974), 26	Schneekabine , Frankreich	schalenförmige Konstruktion	$L \cong 2$ m	

1977	 <p>Sawada (1977), 49</p>	<p>My My Wohnkapsel, Japan Arch.: Hideaki Yokoyama, Hidezo Kobayashi 4,3 m x 2,5 m Außenmaß, 8,5 m² wird in Erde eingebracht, nur Tür schaut heraus GF-UP, gesonderte Sanitäreinheit ist seitlich ansetzbar 4 vershd. Typen ausgearbeitet A/B/C/B+C Oberschale 5mm GFK Unterschale 5 mm – 12 mm Sperrholz – 30 mm Spundwandprofil GFK</p>	<p>schalenförmige Konstruktion aus 2 Schalen zusammengesetzt,</p>	<p>2,49 × 4,285 × 2,0 m</p>	
------	--	---	---	-----------------------------	--

4.3.3 Zugbeanspruchte Tragwerke (Membrankräfte)

Jahr		Projekt Name/ Standort/ Arch/ Ing	Tragwerksbeschreibung	Spannweite der Haupttrag- glieder	Belastung g/p/q [kN/m ²]
1958		USA-Pavillon auf der Weltausstellung in Brüssel , Herst.: Kalwall-Corp. USA Hängedach mit Tragkonstruktion aus aufgelegten GFK-Elementen, t = 70 mm	1. Hängedach: Außenring D = 116 m, Innenring D = 23 m, mit Speichen (Stahlseilen) verspannt, mit Kunststoffelementen d = 70 mm bedeckt 2. Hängende Wände	3 x 1,20 m auf Hängeseilen	
	Schwabe (1958), 329				
1960		New York State Pavillon New York Fair	Hängedach mit Sandwichpaneelen mit GFK-Deckschichten auf Aluminium Zugseilen	L = 5,20 m von Seil zu Seil	
					
	Dietz 81969), 8				
1964		Ausstellungs Schirmkonstruktion "Les échanges" Expo '64 Ing.: Heinz Hossdorf GFK-Hyparflächen + Stahlverbund Elemente 18 x 18 m	vorgespannte Hyparschalen im Verbund mit einem Stahlrahmen Stütze: Beton	L _x = L _y = 18 m	g = 0,030 DFL = 0,055 GFL
	Hossdorf (1963), (1966), (2003)				
1966		Dachkonstruktion in Genua, Italien Renzo Piano u. Forschungsinstitut vorgespannte GFK-Stahlkabelsystem 60 m x 40 m, Module von 10 m x 10 m, Hohlkammer Sandwich GFK 2,5 mm außen, 1,5 mm innen	Unterspannungsnetz aus stählernen Zugstangen und Luftstützen, darin aufgehangen HP-Elemente 2,5x2,5x0,2 m zur Lastaufnahme sternförmige Verstärkung	L _x = L _y = 10 m	g = 0,07
	Compagno (1991), 60				
1970		Pavillon der italienischen Industrie für EXPO Osaka, Japan Arch.: Renzo Piano Ing.: SERTEC Ingenieering Herst.: E. Piano Bauunternehm. für Weltausstellung, 30 m x 38 m Fläche GUP Wandsegmente 6 m x 8,5 m, auf Baustelle aus 4 Teilen zu formsteifen, dreidimensionalen Körpern zusammengesetzt, diese mit vorgespannten Kabeln, die an Seitenstützen verankert sind, verbunden Hohlkammer-Sandwich 4mm – 2 bis 6 cm – 4mm (6 mm an der Spitze)	unterspanntes Stahlskelet, bestehend aus den vertikalen Rand- und Mittelstützen und den horizontalen Druck- und Zugstäben. Darin an den Zugbändern aufgehängt sind Hyparschalen (4 Segmente), 2 HP-schalen zusammengekommen spannen frei, HP Elemente durch Stahlskelett vorgespannt	Spannweite L = 17 m (Elemente 8,5 m x 8,5 m)	g = 0,15
	Zerning (1975), 58 Makowski (2/1969), 10 Compagno (1991), 80				
1980		Hochbehälter Südthüringen 7500 m ³ Volumen Gesamtdurchmesser D = 50 m, Membran GFK 5 mm	Dach: 1. hängende Kugelkalotte D = 25 m 2. hängende neg. gekrümmte Torusfläche L = 12 m	D = 25 m	
	Ackermann (2001), 511				

Literatur- und Quellenverzeichnis

- Ackermann, Günther, Beutner, Michael (Hrsg.): *Viskoelastische Stabwerke – Beitrag zur Berechnung der linearen Theorie der Viskoelastizität*. Heft 59 (1972)
Schriftenreihe der Bauforschung, Reihe Technik und Organisation der Bauakademie der DDR
- Ackermann, Günther; Beutner, Michael (Hrsg.): *Dünnwandige einschichtige Konstruktionen aus Kunststoffen – Empfehlungen zur Berechnung*. Heft 104 (1982)
Bauforschung und Baupraxis, Bauinformation der DDR, Berlin
- Ackermann, Günther: *Umdruckmaterial für das Fach Plastkonstruktionen*. überarb. Fassung März 1989, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Sektion Bauingenieurwesen
- Ackermann, Günther: Der Bau von Tragwerken aus Kunststoffen im Osten Deutschlands (1945-1990). In: *Bautechnik* Heft 7 (2001), S. 503-523
- Ackermann, Kurt: *Tragwerke in der konstruktiven Architektur*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1988
- Anteil des Fertigbaus 1967. In: *Architektur & Wohnform* Heft 8 (1968), S. 231
- Ajrapetov, D. P.: *Architectural material science*. Mir Publishers Moscow, English translation, 1986
- Atkins, Mark: *House of the Future brochure*. 1960s version, - Werbebroschüre
- Attraktion in Hannover: Das erste Kunststoff-Röhrenhaus der Welt aus Palatal*. Ludwigshafen, 1970. – Firmenschrift, Presse-Information
- Balkowski, D.: Das Kunststoffhaus als Konstruktionsform. In: *dbt (Deutsche Bautechnik)* Heft 2 (1962), S. 118-119
- Bancilhon, Philippe, Atelier d'Architecture et d'urbanisme, Frankreich, Paris, Tel 01.53.27.66.12, Fax 01.53.27.66.10: Brief vom 24.05.2004 an Elke Genzel, FOMEKK, Bauhaus-Universität Weimar
- Bancilhon, Philippe: *La Bulle six coques*. Paris : Eigenverlag jousse entreprise, 2003
- Barth, Karl: Skizze eines Rundgangs durch die Ausstellung. In: *Neue Züricher Zeitung* : (1964-04-23)
- BASF Information*. Ludwigshafen, (Heft 9) 1970, - Firmenschrift
- BASF Unternehmensarchiv, Ludwigshafen, - Archivmaterial
- Bau einer großen Radar-Kuppel aus Glasfaser-Polyesterharz. In: *Kunststoffe* Heft 11 (1960), S. 651
- Benjamin, B. S., Makowski, Z. S.: the analysis of folded-plate structure in plastics. Conference in plastics in Building Structure, London 1965, Elsford : Pergamon Press, 1966
- Benjamin, B.S.: *Structural Design with Plastics*. New York: Reinhold Book Corp., 1969
- Bernert, J.; Hintersdorf, G.; Wende, A.: Gestaltung und Dimensionierung von Konstruktionen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen – ausgeführte Beispiele in der DDR. In: *Iff-Mitteilungen* Heft 12 (1966), S. 441-451
- Beyer, W.: Glasfaserkunststoffe für die Bautechnik: Kennwerte für GFK. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1956), S. 591
- Bilder einer Ausstellung. In: *Baumwelt* Heft 10 (1971), S. 1597
- Billington, David P.: *The Art of Structural Design: A Swiss Legacy*. New Haven and London : Yale University Press. 2003
- Boller, K.H.: *Effects of Long-Term Loading on Glass-Fiber-Reinforced Plastic Laminates*. New York : Reinforced Plastics Division, Society of the Plastic Industry: 1956. – Proceedings
- Born, J.: *Praktische Schalenstatik*. Berlin : Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, 1960
- Born, J.: *Schalen, Faltwerke, Rippenkuppeln und Hängedächer, Band 3 Rippenkuppeln Faltwerke und Hängedächer*. Düsseldorf : Werner Verlag, 1964
- Budde, Hans: Auswertung von Presseberichten zum 42. Bundestag des BDA. Kongreß Wie werden wir Wohnen. In: *Der Architekt* Heft 8 (1967), S. 371-375
- Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM): Prüfungszeugnis, Aktenzeichen 2.2/15 665, 3. Ausfertigung, Antrag vom 22.9.1971, Antragsteller Firma Wolfgang Feierbach in Altenstadt (Hessen): Bauteil- und Materialprüfungen für den Antrag auf bauaufsichtliche Zulassung des Bausystems fg 2000
- Büro Casoni & Casoni. Basel, 2004, Archivmaterial
- Büttner, Oskar; Hampe, Erhard: *Bauwerk Tragwerk Tragstruktur - Band 2*. 1. Aufl. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1984
- Chaneac, J. Nicoulaud: Oui à l'architecture pour le plus grand nombre: les recherches de chaneac et l'industrialisation du bâtiment. In: *Plastiques Bâtiment* Heft 118 Juni (1968), S. 17-19
- Château, Stéphane Du: *Structurales spatiales en architecture*. Bruxelles : Cahiers du centre d'études architecturales, 1967
- Château, Stéphane Du : Die Kunststoffanwendung bei weitgespannten Überdachungen. In : *plasticconstruction* Heft 2 (1972), S. 53-59
- Chemelli, Angelo: Baudokumentation. St. Gallen, 2004, - Archivmaterial
- Coques en Plastique Hotel a Charm El Cheikh. In : *techniques et Architecture* Heft 114 (1973), S. 98
- Compagno, A. : *Renzo Piano : Eine methodische Suche nach Kompetenz*. In : Bericht Nr. 16 (1991), Institut für Hochbautechnik ETH Zürich, S. 9-51
- Conen, H.: Versteifte Schalen aus Glasfaser-Kunststoff. In: *Kunststoffe* Heft 2 (1966), S. 105-109
- Conen, H.: Deformation und Versagen von GFK-Strangschlaufen. In: *Kunststoffe* Heft 9 (1966), S. 629-631
- Craemer: Scheiben und Faltwerke als ein neues Konstruktionsprinzip des Eisenbetonbaus. In: *Beton und Eisen* Heft 13 (1929), S. 254-257
- Dahinden, Justus: Gründung einer neuen Stadt: Radio City. In: *Architektur & Wohnform* Heft 5 (1969), S. 231-234
- Davies, R.M.: Aluminium im konstruktiven Ingenieurbau Großbritanniens. In: *Aluminium* Heft 2 (1962), S. 98-109
- Der „Wohnberg“ am Luganer See. In: *Hobby...die Zukunft miterleben* Heft 24 (1968), S. I-IV
- Der Hessische Minister des Inneren: *Zulassungsbescheid für das Bausystem fg 2000 aus glasfaserverstärktem Polyesterharz*. Zulassungsnummer: VA2-64b08/33-111/73, Wiesbaden : 12. Oktober 1973
- Die BASF auf der Hannover-Messe 1970*. Ludwigshafen, 1970. - Firmenschrift, Presse-Information
- Die Kunststoffmesse K '71 in Düsseldorf. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1971), S. 982-986
- Die Wochenschau: Wer hat Angst vor Gelb, Braun, Grün?!. In: *Baumwelt* Heft 9 (1998), S. 392
- Dieterich, Gerhart: *statische Berechnung für das fg 2000*, Mainz, nicht datiert, enthalten in Feierbach, Wolfgang; Misske; M.: *Kunststoffhaus fg 2000 (1970)*, ca. 1967
- Dieterich, Gerhart: *Statische Berechnung für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Kunststoffbaus FG 2000*, Mainz, Oktober 1972, Nr. 71038
- Dietz, Albert G.H.: *Engineering Laminates*. New York: John Wiley and Sons, 1949
- Dietz, Albert G.H.: Better Buildings with Plastics. In: *Modern Plastics* Nummer 6 (1955), S. 85-90
- Dietz, Albert G.H.: Plastics in Building. In: *B.O.C.A. News* Nummer 10 (1956), S.1-5
- Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; Whittier M.R.P.; Gigliotti, M.F. u.a.: *Final Report – Engineering Analysis and Structural Design of the Monsanto House of the Future*. MIT Engineering Department and Monsanto Chemical Company, Plastics Division : 1957
- Bildrechte: Monsanto Chemical Company
- Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; R.W.; Goody, M.; Whittier M.R.P.: Engineering the House of the Future – Part 1. In: *Modern Plastics* Juni (1957), S. 143
- Dietz, A.G.H.; Goody, M.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; Whittier, M.F.: Engineering the House of the Future – Part 2. In: *Modern Plastics* Juli (1957), S. 119
- Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; Chamber, R.E.: *On the Use of Plastics and other Composite Materials for Shell Roof Structures*. San Francisco : World Conference on Shell Structures, 1962

- Dietz, Albert G.H.: Baukonstruktionen aus Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 5 (1967), S. 306-316
- Dietz, Albert G. H.: *Plastics for Architects and Builders*. London : MIT Press, 1969
- Dietz, Albert G. H.: *Kunststoffe in tragenden Konstruktionen*. Internationales Symposium „Kunststoffe im Bauwesen“, Rotterdam : 1970
- Dietz, Albert G.H.: Plastics for Architects and Builders. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1971), S. 17-19
- Diogenes mit Komfort*. Ludwigshafen, 1970. – Firmenschrift, Presse-Information
- Dischinger, Franz: *Handbuch für Eisenbetonbau*. Band 6. 4. Aufl. Berlin : Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, 1928
- Doernach, Rudolf: Großbauteile für den Hausbau aus Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1960), S. 355-356
- Doernach, Rudolf: *ika '72 – 2. Internationale Kunststoff-Haus-Ausstellung der Welt*. Lüdenschied : 1972, - Ausstellungskatalog
- Doernach, Rudolf: *Bausysteme mit Kunststoffen*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1974
- Domke, Helmut: Zur Bemessung tragender Konstruktionen aus Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1975), S. 195-202
- Domke, H., Rübben, A.: Einfluss des tatsächlichen Lastablaufes auf Kriechverhalten und Festigkeit von Kunststoff-Konstruktionen. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1976), S. 173-179
- Domke, H., Rübben, A.: Einfluss des wirklichen Temperaturablaufes auf Kriechverhalten und Festigkeit von tragenden Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 2 (1977), S. 52-57
- Domke, H.: Struktureologisches Modell zur Beschreibung des Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhaltens von Kunststoffen In: *plasticconstruction* Heft 3 (1977), S. 104-107
- Domke, H., Rübben, A.: Allgemeines Berechnungsverfahren für tragende Kunststoffkonstruktionen aus GF-UP-Mattenlaminaten, In: *Bauingenieur* 52 (1977), S. 205-210
- Domke, H.; Rübben, A.: *Kunststoffbau*. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag, 1981
- Döring, Wolfgang: Hochhausprojekt 1964, Archivmaterial
- Drei Kaufangebote für Kunststoffhäuser. In: *Kunststoff-Berater* Heft 9 (1969), S. 712
- Dreidimensionales Gestalten. In: *Bauen + Wohnen*. 1969, Heft 8, S. 287
- Dubigeon-Normandie. In: *techniques et Architecture* Heft 4 (1971), S. 97
- Duflos, J.: Der Einsatz glasfaserverstärkter Kunststoffe in Frankreich. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1961), S. 783
- Dutler, F. U.: Kunststoff-Wohnröhre - Leistungsverzeichnis. aufgestellt in CH - 9000 St. Gallen, ca. 1970
- Eggert, Helmut: Verformungsberechnung biege- und normalkraftbelasteter Kunststoffstäbe. In: *plasticconstruction* Heft 4 (1971), S. 157-160
- Ehrenstein, Gottfried, W.: *Faserverbund-Kunststoffe*. München: Carl Hanser Verlag, 1992
- Ehrenstein, Gottfried, W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2004
- Ein Kunststoff-Kugelhaus. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1960), S. 359
- Einsfeld, Ulrich: Beurteilung von Kunststoffen vom Standpunkt der Bauaufsicht. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1973), S. 17-19
- Eisert, Derek; Noack, Torsten; Ruth, Jürgen: *Bewertungsstrategien für hybride Tragwerke*. Beiträge zum 37. Forschungskolloquium des DAfStb, Bauhaus-Universität Weimar, 07.-08. Oktober 1999
- Eisert, Derek: *Bewertung von Bauwerken mit der Effizienzwertmethode: Untersuchungen zur ganzheitlichen Qualität*. Weimar : Bauhaus-Universitätsverlag, 2004
- Ekchian, R.: Grundsätze für die Konstruktion von Gebirgsbiwaks aus Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 6 (1974), S. 299-301
- Elementierte Bauten in Nord-Kanada. In: *Baumeister* Heft 3 (1973), S. 330-333
- Empfangsgebäude des Flughafens von Dubai am Persischen Golf. In: *Detail* Heft 5 (1972), S. 969-972
- Engel, Heino: *Tragsysteme*. Ostfildern-Ruit : Gert Hatje, 1997
- Erstes Kunststoff Röhrenhaus. In: *Bauen + Wohnen*, Heft 9 (1969), S. 6
- Faber, Colin: *Candela und seine Schalen*. München : Callwey, 1965
- Facing the housing challenge. In: *Modern Plastics* May (1969), S. 62-66
- Feierbach, Wolfgang; Misske, M.: *Kunststoffbaus fg 2000*. fg design : 1970, Planungsmappe
- Feierbach, Wolfgang: *Zulassung Bausystem fg 2000*. Altenstadt : 1973, Presseinformation
- Feierbach, Wolfgang: fg 2000 – Planung, Konstruktion, Herstellung. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1973), S. 212-217
- Feierbach, Wolfgang: Rastersystem für Kunststoffhäuser. In: *Bauwelt* Heft 2 (1974), S. 64-69
- Feierbach, Wolfgang, Altenstadt/Hessen, 2004, Archivmaterial
- Fiche d'Inventaire. Tramelan, 2003, unv. Archivmaterial
- Firma König (Dietikon) (3. August 1971): *Protokoll eines Diskussionsgesprächs*
- Flügge, Wilhelm: *Statik und Dynamik der Schalen*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 1957
- FOMEKK: Archivmaterial
- FOMEKK: Diasammlung fg 2000. Weimar, 2001, Archivmaterial
- FOMEKK: Exkursion Büro Casoni & Casoni, Basel, 2004, Archivmaterial
- FOMEKK: Exkursion Firma Jalousien Gockl, Freiburg, 2004, Archivmaterial
- FOMEKK: Exkursion Helsinki, 2004, Archivmaterial
- FOMEKK: Exkursion Schweiz, 2002, Archivmaterial
- FOMEKK: Exkursion, 2004
- FOMEKK: Futuro Nr. 013, Berlin, 2004, - Archivmaterial
- Forum: Tankstelle aus GFK-Schalen und GFK-Raumeinheiten. In: *Bauen + Wohnen* Heft 11 (1972), S. 484
- Frenz, Reinhold: Ein Kunststoff-Haus im Bungalow-Stil. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1960), S. 360-364
- Futuro – Maison de vacances en matériaux plastique. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Heft 3 (1970), S. 95
- Galfetti, Gustau Gili: *Model Apartments*. Barcelona : Eigenverlag, 1997
- Ganz-Plastik-Haus auf der Ausstellung Arts Ménagers 1956 in Paris. In: *Bauen + Wohnen* Heft 2 (1957), S. 57-59
- Geodesic Dome. In: *Modern Plastics* September (1954), S. 162
- Genzel, Elke: *Raumabschließende Tragwerke*. Skript an der Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl Entwerfen und Tragwerkskonstruktion und Tragwerkslehre : 1999
- Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005
- Gericke, F.-K.: Zur Berechnung von Bauteilen aus Platten in der UdSSR. In: *Bauplanung und Bautechnik* Heft 9 (1969), S. 432-434
- Gigliotti, Michael; Goody, Marvin; Heger, Frank; u.a.: Sandwichplatten aus Kunststoff. In: *Bauen + Wohnen* Heft 10 (1961), S. 384-391
- Gilkie, R. C.; Robak, D.: Recent developments in plastics stresses-skin pyramidal roof system. In: *Plastics in Building Structures* Proceeding of a conference held in London, 1. Edition, London : Pergamon Press, 1966
- Gilkie, R. C.: *Pyramids in lightweight roof system*. Ph.D. Thesis, University of London, 1967
- Girkmann, Karl: *Flächentragwerke*. 5. Aufl. Wien : Springer Verlag, 1959
- Goody, Marvin: Prototype d'école en matière plastique, Etat-Unis. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Heft 2/3 (1961), S. 32-33
- Goody, Marvin; Heger, Frank; Gigliotti, Michael u.a.: Sandwichplatten aus Kunststoff für den Bau einer Volksschule. In: *Bauen + Wohnen* Heft 10

- (1961), S. 384-391
- Götze, Heinz: Kunststoffhäuser: Futuro-Freizeithaus. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 14 (1969), S. 30
- Grünig, M.: *Die Statik des ebenen Tragwerkes*. Berlin : Julius Springer, 1925
- Guillot, Nicole: Jean Maneval. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Heft 148 (1970), S. 56-59
- Hampe, Erhard: *Rotationssymmetrische Flächentragwerke, Stabilität der Rotationsschalen*. Berlin (Ost) : Verlag für Bauwesen, 1983
- Habitations préfabriquées en matière plastiques en France. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Nr. 117 (1965)
- Hausake Röhrenhaus. Stadt Drost, Stadtverwaltung, Bauordnungsamt : 1980
- Hausermann, P.: Les Domobiles. In: *techniques & Architecture* Heft 4 (1972), S. 82
- Hanusch, Hugo: Bauteile aus GFK-Wellkern-Verbundelementen. In: *Kunststoffe* Heft 11 (1967), S. 865-867
- Heid, G.; Seifert, T.: *Untersuchungen und Entwicklungen einer Montagebauart unter Verwendung von Kunststoffen und Kunststoffelementen – Teil 1: Vergleichende Untersuchungen*. im Auftrage des Bundesministeriums für Wohnungsbau unter Mitwirkung des Institutes für Bauforschung e.V.: Hannover, 1959
- Heimann, Jim: *All American Ads of the 50's*. Köln : Taschen-Verlag, 2001
- Hellwege, K.-H.; Würtiger, H.: Rissbildung von GFK-Laminaten infolge dynamischer Beanspruchung. In: *Kunststoffe* Heft 58 (1968), S. 163-167
- Hener, York: Das Superding zum Wohnen. In: *Hannoversche Presse* (1970-04-08)
- Hiersig, Thilo C.: *Die utopischen Architekturmodelle der 60er Jahre*. Aachen, Universität, Fachbereich Architektur, Diss., 1980
- Hilgenberg, Axel: Beitrag zur Bemessung von Baukonstruktionen aus Kunststoffen unter besonderer Berücksichtigung der Windbelastung. Aachen, Universität, Fachbereich Bauingenieurwesen, Diss., 1974
- Hilgenberg, Axel: Windbelastung bei Baukonstruktionen aus Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1976), S. 1-6
- Hintersdorf, G.: *Stützstoffbauweise – Gestaltung und Dimensionierung*. Dresden : Institut für Leichtbau, 1965
- Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke aus schalenförmigen und gekrümmten GFK-Fertigteilen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 899-902
- Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Praktische Dimensionierungsverfahren für tragende GFK-Bauteile. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1966), S. 847-854
- Hintersdorf, Gert: *Tragwerke aus Plaste*. Berlin (Ost) : Verlag für Bauwesen, 1972
- Hollaway, L.: Festigkeitsuntersuchungen an monolithischen, glasfaserverstärkten Kunststoff-Konstruktionen. In: *plasticconstruction* Heft 6 (1972), S. 267-270
- Home, Marko; Taanila, Mika: *Futuro – Tomorrow's House from Yesterday* Helsinki : Desura Oy Ltd., 2002
- Hoppe, Peter: Baukonstruktionen unter Verwendung harter Schaumstoffe. In: *Kunststoffe* Heft 10 (1963), S. 766-777
- Hoppe, Peter: Fortschritte bei der Anwendung von Polyurethan-Schaum. In: *Kunststoffe* Heft 3 (1967), S. 146-152
- Hossdorf, Heinz: *Plastic Shell Structure for the Swiss National Exhibition in 1964*. World conference on Shell Structure, San Francisco : Oktober 1962
- Hossdorf, Heinz: *Projekt, statische und experimentelle Untersuchung für die Kunststoffkonstruktion des Hauptpavillons*. statische Berechnung des Ingenieurbüros H. Hossdorf Ingenieur SIA, Tellplatz 12, Basel, erstellt zu Händen der technischen Expertenkommission der Expo 64 in Lausanne, 1963
- Hossdorf, Heinz: Design construction and experience with post-tensioned polyester roof in the Swiss National Exhibition. In: *Plastics in Building Structures*, Proceeding of a conference held in London, 1. Edition, London : Pergamon Press, 1966
- Hossdorf, Heinz: *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*. Basel : Birkhäuser Verlag, 2003
- Hossdorf, Heinz: unveröff. Archivmaterial, Madrid, 2004
- Hubschraubertransport?. In: *Detail* Heft 6 (1969), S. 1253/1254
- Hufnagel, Florian (Hrsg.): *Plastics + Design* - Ausstellungskatalog, Neue Sammlung, Staatl. Museum f. angew. Kunst München. Stuttgart: ARNOLDSCH, 1997
- Hühnerfarm. In: *Element + Fertigbau* Heft 11 (1971), S. 14-16
- Hütter, Ulrich: Hochbeanspruchte Leichtbauteile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1970), S. 318-324
- Huybers, P.; Wildschut, A.J.: Forschungen über Kunststofftragwerke. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1971), S. 3-11
- Huybers, Peter: *See Through Structuring*. Delft, Technische Hochschule, Diss., 1972
- Huybers, P.: Entwicklung genormter Baustrukturen aus Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 3 (1973), S. 105-111
- IBK Bibliothek: Sammlung SL 7.70. Ludwigshafen, 2004, - Archivmaterial
- Ifert, Gérard: Pré-Magasin Prisunic. In: *Bauen + Wohnen* Heft 3 (1968), S. 4
- Igloo – maison d'habitation. In: *techniques & Architecture* Heft 4 Juli (1959), S. 19
- In: *l'architecture d'aujourd'hui* Nr. 131 (1967), S. 84-90
- In: *Modern Plastics* April (1951), S. 87
- In: *Plastic Industrie* Oktober (1953), S. 27
- In: *plastiques bâtiment* Nr. 119/120, Juillet/Aout (1968), S. 21
- In: *plastiques bâtiment* Nr. 122, Octobre (1968), S. 14
- Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V. (Hrsg.): *Kunststoffhäuser und Raumzellen*. Darmstadt : IBK-Verlag, 1973
- IKA '72 Lüdenschied. In: *Bauen mit Kunststoffen* Heft 4 (1972), S. 201-204
- Isler, Heinz: Schalenkonstruktionen. In: *Bauen + Wohnen* Heft 6 (1968), S. 197-203
- Isler, Heinz: *Statische Berechnung für Kunststoff-Röhrenhaus*. mit Prüfstempel und Prüfbericht Nr. 1 von Zerna, E.h.W., Bochum, 24.07.1981, Prüfnummer 1435 Prüfverzeichnis 1981, Burgdorf : März 1970
- Isler, Heinz: *Kunststoffe für tragende Bauteile* - Vortrag SIA Fachgruppe, Burgdorf : 1975, - Schriftenreihe
- Isler, Heinz: Tragende Bauteile aus Kunststoff: Anwendungsbeispiele. In: *Schweizer Bauzeitung* Heft vv (1977), S. 13-20
- Isler, Heinz: Erfahrungen mit selbsttragenden Kassettenplatten aus Gf-UP. In: *plasticconstruction* Heft 3 (1977), S. 118-122
- Isler, Heinz: *Newer Structures in Plastic Materials*. Burgdorf : 1984, unv. Archivmaterial
- Isler, Heinz: Geschichte und Entwicklung der Schalenkonstruktionen – I. Internationales Symposium des SFB 230. Natürliche Konstruktionen – *Mitteilungen des SFB* Heft 3, September, 1988
- Isler, Heinz: *Spiel ohne Grenzen*. Sonderdruck aus Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 12, Ingenieurarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Baukonstruktion: Juli 2002
- Isler, Heinz: Archivmaterial, Burgdorf, 2002
- Isler, Heinz: Eduardo Torroja and the IASS, The international Association for shell structures. In: *Eduardo Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of Building*. International Seminar Politecnico Torino. Milano: FrancoAngeli, 2003
- Jackson, Lesley: *the sixties*. London : Phaidon Press, 2000
- Jousse-Entreprise Galerie: Archivmaterial, Paris, 2004
- Kalman, Z. H.: *The Selection of load-bearing structures for Buildings*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1986
- Kasiske, Michael: Von Helsinki zum Plänterwald. In: *Baumwelt* Heft 46 (2003), S. 28-31
- Katholisches Pfarramt Fellbach (Hrsg.): *Kirche Maria Regina*. Fellbach : 2003
- Kind-Barkauskas, Ferdinand: *Beton-Atlas*. Köln : Müller verlag, 2001

- Klöppel, K.; Jungbluth, O.: Beitrag zum Durchschlagproblem dünnwandiger Kugelschalen. In: *Stahlbau* Heft 6 (1953), S. 121-130
- Klotz, Heinrich: *Vision der Moderne*. München : Prestel Verlag, 1986
- Knappe, W.; Wurtinger, H.: Einfluß von Schwingbelastungen auf die Rest-Kurzzeitfestigkeit von GFK-Laminaten. In: *Kunststoffe* Heft 59 (1969), S. 975-981
- Knitz, Andreas: Archivmaterial, Berg b. Ravensburg, 2004
- Krasny, Elke; Rapp, Christian: Die Flucht nach vorne. In: *Architektur aktuell* Heft 201 (1997), S. 82-91
- Krause, Joachim; Lichtenstein, Claude: *Your Private Sky – R. Buckminster Fuller*. Baden : Lars Müller Verlag, 1999
- Krieger, Hans: Haus der Zukunft steht auf Stelzen. In: *Rheinische Post* : (1970-05-12)
- Krochmal, G.: Kunststoffe am Bau, Entwicklung und Stand der Verwendung. In: *Der Architekt* Heft 9 (1971), S. A 442–A 452
- Kulturpark Berlin, 1. Bauabschnitt – Vergnügungspark. in *Deutsche Architektur* Heft 9 (1970), S. 525-529
- Kunststoffe im Bauwesen. In: *Kunststoffe* Heft 5 (1961), S. 285-291
- Kunststoffhaus fg 2000. Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“, des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau Bonn – Nr. 04.001, Bad Godesberg : 1973
- Kunststoffhäuser in Japan. In: *plasticconstruction* Heft 6 (1971), S. 282
- Kunststoff-Ferienhäuser. In: *plasticconstruction* Heft 3 (1972), S. 125
- Kunststoff-Überdachungen. In: *Bauen mit Kunststoffen* Heft 1 (1972), S. 44
- Künzel, H.: Müssen Wände und Decken absorptionsfähig für Wasserdampf sein? In: *Bauen mit Kunststoffen* Heft 2 (1972), S. 93-96
- Kupfer, Herbert: Die Betonschalen von Franz Dischinger und Ulrich Finsterwalder. In: *Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens*, Heft 7 -Schalen, München, Technische Universität, 1990
- Kurrer, Karl-Eugen: *Die Geschichte der Baustatik*. Berlin : Ernst und Sohn, 2002
- Langlie, Carsten: Tragfähigkeit ausgeschäumter GFK-Hohlprofile bei Kurzzeitbelastung. Berlin, Technische Universität, Fachbereich Architektur, Diss., 1971
- Langlie, Carsten: Tragfähigkeit von GUP-Tragwerkspylonen. In: *plasticconstruction* Heft 3 (1972), S. 120-124
- Langlie, Carsten: GFK-Sandwechelemente mit neuem Kernmaterial. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1972), S. 790-798
- Langlie, Carsten: fg 2000 – Planung, Konstruktion und Berechnung. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1973), S. 221-224
- Langlie, Carsten: Bauen mit Kunststoffen gestern – heute – morgen, eine kritische Betrachtung. In: *IBK Seminar Handbuch*, Darmstadt : 1986
- Langlie, Carsten: Die Brauchbarkeit von GF-UP-Konstruktionen unter Dauerbelastung erläutert am Beispiel „fg 2000“. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 4 (1978), S. 145-148
- Langlie, Carsten: Fliegende Bauten aus GF-UP. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 3 (1983), S. 101-102
- Langlie, Carsten: *Statische Berechnung für „fg 2000“*. Berlin, Februar 1973, mit Prüfstempel von Dieterich, Gerhart, Mainz, 16.3.1973, Prüfnummer 909.73.638, Rheinland-Pfalz
- Langlie, Carsten: Praktische Bemessung von kurzzeitig belasteten Sandwichkonstruktionen. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1974), S. 256-263
- Laperelle, Pierre: Éléments de construction en polyester armé. In: *techniques & Architecture* Heft 5 (1969/70), S. 60-65
- Les Matières Plastiques dans les batiment. In: *techniques & Architecture* Nr. 12 (1959), S. 68-119
- Letzte Seite: fg 2000. In: *Baumwelt* Heft 49 (1969), S. 1796
- Linne, Stefan: *Möglichkeiten für lösbare, kraftschlüssige Verbindungen von modularen Bauwerken aus FVK im Bauwesen*. Weimar, Bauhaus-Universität, Diss. in Bearbeitung
- Ludwig, Matthias: ... in die Jahre gekommen, ein Wohnhaus aus Kunststoff. In: *db deutsche bauzeitung*, Heft 7 (1998), S. 76-80
- Ludwig, Matthias: *Mobile Architektur*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1998
- maison préfabriquée. In: *L'architecture d'aujourd'hui* Nr. 124 (1966), S. 98-101
- Makowski, Z.S.: The analysis of folded-plate structures in plastics. In: *Plastics in Building Structures*, Proceeding of a conference held in London, 1. Edition, London : Pergamon Press, 1966
- Makowski, Z.S.: l'emploi des matières plastiques comme éléments structuraux dans le bâtiment. In: *Plastiques Batiment* Heft 119/120 (1968), S. 11-22
- Makowski, Z.S.: le centre de recherches sur les éléments de structure en plastiques à l'université du surrey. In: *Plastiques Batiment* Heft 9 (1968), S. 12-24
- Makowski, Z.S.: le structures en plastiques de renzo piano. In: *Plastiques Batiment* Heft 2 (1969), S. 10-17
- Makowski, Z.S.: Tragwerke aus Kunststoffen. In: *Bauen + Wohnen* Heft 6 (1969), S. 222-227
- Makowski, Z.S.: Methods of Building Self Supporting Plastics Structures. In: *plasticconstruction* Heft 2 (1971), S. 53-62
- Makowski, Z.S.: The Structural Applications of Plastics. In: *Plastics in Building Tomorrow Symposium*, Kopenhagen, 1972
- Matières Plastiques 5. In: *techniques & Architecture* Nr. 3 (1971), S. 34-93
- McHale, John: Les Structures de Buckminster Fuller. in *L'architecture d'aujourd'hui* Heft 1 (1961/62), S. 50-55
- Meier, Urs: *Grundlagen zum Bemessen von Kunststoffbauteilen*. ETH-Vorlesung 39-605, Ausgabe SS 1995
- Meikle, Jeffrey L.: *American Plastic – A Cultural History*. New Brunswick und New Jersey : Rutgers University Press, 1995
- Menges, Georg: Abschätzung der Tragfähigkeit mäßig beanspruchter Kunststoff-Formteile. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1967), S. 476-484
- Menges, Georg; Schwarz, O.: Kennwerte für das Langzeitverhalten von glasscheidenmattenverstärkten ungesättigten Polyesterharzen unter ruhender Last. In: *Kunststoffe* Heft 11 (1969), S. 775-779
- Menges, Georg; Dolfen, E.: Prüfung und Dimensionierung von tragenden Bauteilen aus GFK. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1969), S. 934-941
- Menges, Georg; Taprogge, Rainer: Denken in Verformungen erleichtert das Dimensionieren von Kunststoffbauteilen. In: *VDI-Zeitschrift* Heft 112 (1970), S. 341-346 und 627-637
- Menges, Georg; Roskothen, H.J.; Empt, P.: Zum Deformations- und Versagensverhältnis von Mattenlaminaten unter besonderer Berücksichtigung des Schubinflusses. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1970), S. 1009-1014
- Menges, G.; Schulze, H.; Knipschild, F.: Dimensionierungsgrundlagen für die Berechnung rippenverstärkter Platten aus Kunststoffen. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1972), S. 215-219
- Menges, G.; Harnier, A.v.; Niederstadt, G.: Der Einfluss der Freibewitterung auf verschiedene Eigenschaften von GFK. In: *plasticconstruction* Heft 6 (1973), S. 280-286
- Menges, G.; Knipschild, F.: Vorschlag zur Abschätzung der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffhartschäumen auf der Basis einer Modellvorstellung. In: *plasticconstruction* Heft 4 (1974), S. 205-211
- Menges, G.; Brintrup, H.: Probleme und Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet tragender Kunststoffe. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1977), S. 12-17
- Meyer-Bohe, Walter: das Einfamilienhaus im Zeitalter der Vorfertigung. In: *Architektur & Wohnform* Heft 4 (1966), S. 299
- Michaeli, W.; Huybrechts, D.; Wegener, M.: *Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen*. München : Hanser, 1994
- Modules ou Mobiles de base à europlastique 74. In: *V.T.P.R.* Heft 7 (1974), S. 25-27
- Mobile Leichtbaueinheiten – System Casanova. In: *Bauen + Wohnen* Heft 3 (1973), S. 109-112
- Monnier, G.; Klein, R.: *les années ZUP*. Paris : Éditions A. et J. Picard, 2002

- Monsanto – *Home of the Future*. State Film Productions, Inc.: Werbefilm, USA, 1957
- Monsanto Chemical Company, Monsanto Magazin March 1968. In: IBK Bibliothek, Sammlung SL 1121. Ludwigshafen, 2004, - Archivmaterial
- Monsanto-Haus. In: *Bauen und Wohnen* Heft 7 (1959), S. 240-242
- Mühlestein, Erwin: Die Revolution blieb aus. In: *Bauen + Wohnen* Heft 4 (1973), S. 137-157
- Natterer, J.; Herzog, T.; Volz, M.: *Holzbaunatlas* 2. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 1991
- Nerding, Winfried: *Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*. München : Prestel Verlag, 2002
- New Jobs for sprayed-on Plastics. In: *Modern Plastics* Oktober (1953), S. 93-98
- Öffentliche Baumappte der Ostschweiz, 1971/72
- Oltmanns, Hans-P.: Die Beziehungen zwischen Architekten, Ingenieuren und der Kunststoff-Industrie. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1973), S. 45
- Oui à l'architecture pour le plus grand nombre: Les recherches de chaneac et l'industrialisation du bâtiment. In: *Plastiques Bâtiment* Juni (1968), S. 17-19
- Otto, Frei: Fragen an den Konstrukteur - 42. Bundestag des BDA. In: *Der Architekt* Heft 8 (1967), S. 371-375
- Patzelt, Otto: Expo '70-Nachlese: Show oder Blick in die Zukunft? In: *Deutsche Architektur*, Heft 12 (1970) S. 740-751
- Peter Benz, Exkursion Japan, 1999, Archivmaterial
- Pflüger, Alf: *Elementare Schalenstatik*. 2. Aufl. Berlin : Springer Verlag, 1957
- Piano, Renzo: *Mein Architekturlogbuch*. Ostfildern-Ruit : Hatje-Canz, 1997
- Plasticope 3. In: *Modern Plastics* Juni (1973), S. 104
- Plastics: technical prospects and architectural imagery. In: *Architectural Review* Heft 8/9 (1965), S. 394
- Plastics in Building Structures*. Proceeding of a conference held in London, 1. Edition, London : Pergamon Press, 1966
- Plastics are rolling into low-cost housing via the mobile home route. In: *Modern Plastics* June (1972), S. 58-63
- Polónyi, S.; Metz, K.: Flächentragwerke aus Glasfaser-Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1968), S. 863-866
- Polónyi, S.: Tragkonstruktionen aus Kunststoffen. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 14 (1969), S. 21-26
- Polónyi, S.: Beulprobleme und Beulsicherung dünnwandiger Tragwerke. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1970), S. 1005-1008
- Polónyi, S.: *Schalen in Beton und Kunststoff*. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag, 1970
- Polónyi, S.: Überdachungen aus GUP – Methoden des Konstruierens. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1973), S. 3-8
- Polónyi, S.; Walochnik, W.: *Architektur und Tragwerk*. Berlin : Ernst und Sohn, 2003
- Prospekt. In: *Bauen + Wohnen*, Heft 9 (1969), S. 6
- Puck, Alfred: Dimensionierung tragender Leichtbaukonstruktionen aus Glasfaser-Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 3 (1963), S. 150-157
- Puck, Alfred: Zum Deformationsverhalten und Bruchmechanismus von unidirektionalem und orthogonalem Glasfaser/Kunststoff. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 913-922
- Puck, Alfred: Festigkeitsrechnung an Glasfaser-Kunststoff-Laminaten. In: *Kunststoffe* Heft 11 (1969), S. 780-787
- Quarmby, Arthur: *The Plastics Architect*. London : Pall Mall Press, 1974
- Quarmby, Arthur: Brief vom 14.03.2005 an Pamela Voigt, FOMEKK, Bauhaus-Universität Weimar
- R.F.A. „Maison tube“ B.A.S.F. In: *techniques & Architecture* Heft 4 (1971), S. 36
- Remmele, Mathias: '68 – *Design und Alltagskultur zwischen Konsum und Konflikt*. Kunstmuseum Düsseldorf, Köln : DuMont, 1998
- Rickenstorff, Günther; Berndt, Eberhard: *Tragwerke für Hochbauten*. 3. Aufl. Leipzig: Teubner, 1989
- Robak, D.: *Stressed-Skin plastic pyramids as elements of double-layer grids*. Ph.D. Thesis, University of London, 1970
- Rondo - *Selbsttragende Schale und innenliegende Tragkonstruktion – Statik*. Statische Berechnung des Büro Dr. Walther & Mori für die CSB Constructa System Bau AG, Wettersteinallee 141, CH- 4058 Basel vom Dez. 1971
- Rüdenauer, A.C., Frenz, R.: *Kunststoffe in der Hand des Architekten*. Stuttgart : Verlag Berliner Union, 1962
- Rühle, Herrmann: *Räumliche Dachtragwerke, Konstruktion und Ausführung – Band 2 Stahl Plaste*. Berlin (Ost) : Verlag für Bauwesen, 1970
- Saechtling, Hansjürgen: Das Haus aus Kunststoff – ein Traumhaus von morgen? In: *Kunststoffe* Band 47, Heft 1 (1957), S. 19-22
- Saechtling, Hansjürgen; Schwabe, Amtor: *Bauen mit Kunststoffen*. Berlin : Ullstein Verlag, 1959
- Saechtling, Hansjürgen: *Bauen mit Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 1973
- Sawada, Seiji: Die japanische Wohnkapsel „My My“ (Mai Mai) = Schneckenhaus. In: *plasticconstruction* Heft 2 (1977), S. 49-51
- Schapitz, E.: *Festigkeitslehre für den Leichtbau: die Berechnung versteifter Schalen und Vollwandssysteme auf Grund der Forschungen aus dem Metallfluggelbau*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1951
- Scheichenbauer, Mario: Kunststoff, Bauwesen und Design. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1974), S. 1-5
- Schein, Ionel: Aspekte eines neuen Kunststoffes. In: *Bauen + Wohnen* Heft 7 (1959), S. 226-239
- Schlaich, Jörg; Heinle, Erwin: *Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1996
- Schlehöfer, B.: Berechnung, Konstruktion und Prüfung von GFK-Druckbehältern. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1968), S. 894-900
- Schneider-Esleben, Paul: *Entwürfe und Bauten / Paul Schneider-Esleben*. Ostfildern-Ruit : Hatje-Canz, 1996
- Schodek, Daniel L.: *Structures*. Third Edition. New Jersey : Prentice-Hall, 1998
- Schrage, I.; Pfeifer, H.: Zum Einsatz von Kunststoffen in tragenden und raumabschließenden großflächigen Bauteilen. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1975), S. 16-21
- Schreyer, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. München : Hanser Verlag, 1972
- Schülerweiterungsbau in Selbsthilfe. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1972), S. 25
- Schunk, Eberhard: Ingenieurporträt Heinz Isler - Bauingenieur und bildender Künstler. In: *db deutsche bauzeitung* Heft 4 (2003), Seite 90-95
- Schwabe, Amtor: Was fängt der Architekt mit den Kunststoffen an? In: *baukunst und werkform* Heft 5 (1953) S. 242-249
- Schwabe, Amtor: Brüssel baute mit Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 7 (1958), S. 327-329
- Schwabe, Amtor: Kleines ABC zum Bauen mit Kunststoffen. In: *Bau-Markt* Nummer 42, Oktober (1959), S. 1603-1610
- Schwabe, Amtor: Kunststoffe im Bauwesen - Fortschritte und Probleme. In: *Der Architekt* Heft 10 (1967), S. A 608-A 615
- Schwabe, Amtor: Freitragende Konstruktionen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1968), S. 867-869
- Schwabe, Amtor: Fertighäuser aus und mit Kunststoffen. In: *Architektur & Wohnform* Heft 8 (1969), S. 410-436
- Schwabe, Amtor: Kunststoffhäuser zu verkaufen. In: *Kunststoffe – Plastics* Heft 9 (1969), S. 342-344
- Schwabe, Amtor: Möglichkeiten und Grenzen von Baukonstruktionen mit Kunststoffen. In: *Detail* Heft 1 (1971), S. 5
- Schwabe, Amtor: IKA '71: Internationale Kunststoffhaus-Ausstellung in Lüdenscheid. In: *Kunststoffe - Plastics* Heft 12 (1971), S. 497-500
- Schwabe, Amtor: Großflächige GUP-Teile im Bauwesen. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1973), S. 14-16
- Schwabe, Amtor: *Entwicklungsstand und Kriterien der Tragkonstruktionen aus Kunststoffen*. Internationales Symposium „plastics in building – a challenge“, Rotterdam : 1974
- Schwabe, Amtor: Kunststoffe in der Bauflaute. In: *prodoc* Heft 5 (1975), S. 161
- Schwabe, Amtor: Wie lassen sich die Hemmschuhe für GFK im Bauwesen beseitigen. In: *plasticconstruction* Heft 3 (1977), S. 97-102
- Schwarz, Otto: Elastisches Verhalten von Glasfaser-Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1966) S. 866-871
- Schwarz, Otto: *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*. Würzburg : Vogel Verlag, Kamprath Reihe, 1975

- Sebestyén, Gyula: *Leichtbauweise*. Budapest : Akademiai Kiado, 1978
- Skeist, Irving: *Plastics in Building*. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1966
- Sonneborn, Ralph H. (Hrsg.): *Fiberglas Reinforced Plastics*. New York: Reinhold Publishing, 1954
- Spielplatzgerät. In: *Bauen + Wohnen* Heft 4 (1973), S. 135
- Steinberg, Elisabeth: Der verplante Tourist - Nach einer Untersuchung des Instituts für Kommunale Entwicklungsplanung B. In: *Baumeister* Heft 8 (1970), S. 933-937
- Streuli, Hans: Der Expo zum Geleit. In: *Neue Züricher Zeitung* : (1964-04-23)
- Structures en coquilles plastiques pour toitures. In: *plastiques batiment* Nr. 125, Januar (1969), S. 16-18
- Suuronen, Matti: Ansio – Ja Työluettelo. Espoo, 1983. - Firmenschrift
- Suuronen, Matti: Espoo, 2004, - Archivmaterial
- Taprogge, Rainer: *Konstruieren mit Kunststoffen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1971
- The BIGGEST Thing in Plastics. In: *Modern Plastics* Oktober (1955), S. 98-99
- The Estate of R. Buckminster Fuller
- These all-plastic Houses are for real. In: *Modern Plastics* August (1970), S. 64-66
- Tetrodon. In: *L'architecture d'aujourd'hui* Heft 6/7 (1972), S. 74-77
- Timoshenko, S., Gere, J.: *Theory of Elastic Stability*. 2. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1961
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.: *Theory of Plates and Shells*. 1. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1959
- Tomorrow's Barn. In: *Modern Plastics* Nummer 6 (1955), S. 92-93
- Thürlimann, Bruno: *Zur Geschichte der Konstruktion und Theorie im Betonbau*. Basel : Birkhäuser, 1981
- Topham, Sean: *Where is my Space Age?* München : Prestel, 2003
- Überblick: Probewohnen in einer „Stadt aus Kunststoff“. In: *Bauwelt* Heft 4 (1971), S. 588
- Überblick: Zum Mond. in *Bauwelt* Heft 8 (1969), S. 1034
- Umschau aus Schrifttum und Technik. In: *Kunststoffe* Heft 2 (1954), S. 66
- une reconversion réussie. In: *Plastiques Batiment* Heft 10 (1967), S. 20
- Venturo – Kunststoffhaus. In: *Bauen + Wohnen* Heft 4 (1973), S. 142
- Voigt, Pamela: *Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärktem Kunststoff - 1942 bis 1980*. Weimar, Bauhaus-Universität, Diss. in Bearbeitung
- Vorstatik Rondo. Statische Berechnung Ing. Dr. Walther , Seite 1-18, ohne Datum
- Wagenführ, Horst: Wie wird im Jahre 2000 gebaut? In: *Der Architekt* Heft 12 (1972), S. A 544 – A 548
- Wagner, Rosemarie; Gabriel, Knut: *Hybride Tragwerke*. Zwischenbericht der Forschungsarbeit an der Universität Stuttgart, Institut für Massivbau: 1987
- Walter, R.: Das Kugelhaus. In: *Aluminium* Heft 9 (1957), S. 602-603
- Weber, Fritz: Raumzellen. In: *Deutsche Architektur* Heft 5 (1970), S.300
- Wende, A.; Bernert, J., Hintersdorf, G.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke aus schalenförmigen und gekrümmten GFK-Fertigteilen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 899-902
- Why not a filament round house? In: *Modern Plastics International* August (1970), S. 14-15
- Williams, R.J.: Dubais Tor zur Welt. In: *plasticconstruction* Heft 6 (1971), S. 261-265
- Williams, R.J.: Brückenüberdachung aus Glasfaserkunststoff. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1972), S. 213-214
- Wohnen 2000. Deutsche Bausparkasse, ca. 1965, - Ausstellungsführer:
- Würtinger, H.: Entwurf und Vordimensionierung tragender Konstruktionen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. In: *VDI-Zeitschrift* Heft 109 (1968), S. 1121-1127, 1710-1714
- Zerning, John: *Design Guide to Anticlastic structures in Plastic*. London : Polytechnic of Central London, 1975 und 1976
- Ziegler, Hasso: Das Wohnen der Zukunft ist schon Vergangenheit. In: *Stuttgarter Zeitung* : (1974-12-17), Nummer 291
- Zöpfel, M.: Sicherheitskennwerte zur Bemessung von Plastkonstruktionen. In: *Plaste und Kautschuk* Heft 10 (1970), S. 765-770

Internetseiten

<http://www.angelfire.com/home/futurohouse/index.html>
http://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Buckminster_Fuller
http://members.aol.com/diziago/HOTF_brochure.html
<http://www.architekten-bsa.ch/perl/prizewinner.pl?year=1999>
<http://www.bfi.org/gallery/FlysEyeDome>
<http://www.bfi.org/gallery/FlysEyeDome>
<http://www.cndyorks.gn.apc.org/fdales/uk&starwars.htm>
<http://www.db.bauzeitung.de/sixcms/media.php/273/buckminsterfuller.pdf>
<http://www.designboom.com/eng/archi/maneval.html>
<http://www.dubaiairport.com/DIAInternet/Airport+Guide/Departing/>
<http://www.ebay.com>
<http://www.feierbach.com>
<http://www.jousse-entreprise.com/html/furniture/maneval/maneval01.html>
http://www.lkt.uni-erlangen.de/pdf/Leseprobe_FVK.pdf
<http://www.olats.org/schoffer/giap1.htm>
<http://www.plasticliving.com/hotf/fhtml>
<http://www.radome.net>
<http://www.radomes.com>
http://www.unb.br/fau/pos_graduacao/cadernos_electricos/_a_concepcao/sthephane.htm
<http://www.salsburg.com/geod/monohex.html>
<http://www.solwaygallery.com/Pages/twelve.html>
<http://www.zacharz.com/duChateau/english.htm>

Gespräche

Genzel, Elke; Pamela Voigt (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (24.09.2002, 13:00-16:00 MEZ): Gespräch mit Heinz Isler
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (17.05.2004, 10:00-10:20 MEZ): Gespräch mit Heinz Hossdorf
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (10.03.2004, 17:00-17:10 MEZ): Gespräch mit René Walter
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (12.08.2004, 14:00-14:10 MEZ): Gespräch mit dem Sekretariat des Büro Walther Mory Maier Bauingenieure AG, CH – 4142 Münchstein, Postadresse = Postfach CH-4023 Basel
 Genzel, Elke; Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (02.09.2001, 10:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Frau Feierbach
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (03.08.2005, 17:00-17:30 MEZ): Gespräch mit Gert Hintersdorf
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (13.10.2005, 12:00-12:15 MEZ): Gespräch mit Gert Hintersdorf
 Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (15.10.2005, 10:00-10:20 MEZ): Gespräch mit Alfred Rübben
 Genzel, Elke (25.05.2006, 10:00-10:20 MEZ): Gespräch mit Carsten Ludwig, B & S Ingenieure, Bern
 Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (20.06.2004, 14:00-14:10 MEZ): Gespräch mit Philippe Jousse, Jousse-Entreprise Galerie
 Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (13.10.2004, 13:00-13:10 MEZ): Gespräch mit Matthias Stief, Berlin
 Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (26.05.2004, 12:00-10:5 MEZ): Gespräch mit Herrn Bolmerg
 Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (23.09.2004, 10:45 -10:50 MEZ): Gespräch mit Frau Dutler, St. Gallen
 Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (21.06.2004, 12:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Herrn Dante Casoni, Basel, CH
 Voigt, Pamela; Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (02.06.2004, 11:30-15:00 MEZ): Gespräch mit Matti Suuronen und Ossi Siponen, (Ingenieurbüro Ossi Siponen, Malminkaari 5, 00700 Helsinki)
 Voigt, Pamela; Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (18.03.2004, 10:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Herrn Gockl, Freiburg

Anhang

In der nachfolgenden Übersicht werden 10 Bauwerke mit Tragwerken aus faserverstärkten Kunststoffen zusammengefasst, die die Entwicklung des Bauens mit Kunststoffen in der Tragstruktur angemessen repräsentieren. Die Bestandsaufnahme erfasst stichpunktartig die folgenden Punkte:

- Lage
- Jahr (Beginn des Projektes, Idee/ Jahr der Fertigstellung)
- Standdauer
- Gebäudetyp
- Ausführung (Prototyp/Serie/einmalige Ausf.)
- Beteiligte (Architekt/Ingenieur/Bauherr/ausführende Firma FVK-Tragwerk)
- Tragwerkstyp (Spannweiten, Abmessungen)
- Bibliographie

In einer ausführlicheren Darstellung werden

- Zustandekommen des Projektes
- Tragwerk
- statische Berechnungen (Berechnungsverfahren/ Belastungen/ Schnittgrößen/ Spannungen)
- Herstellung (Schalung)
- Errichtung (Transport/Montage)

beschrieben.

Die ausgewählten Projekte zeichnen sich sowohl durch herausragende Gestaltung als auch vorzügliche konstruktive Durchbildung aus. Des weiteren zeigen die Beispiele die Entwicklung der Bemessung von faserverstärkten Kunststoffen.

Die Bedeutung der mitwirkenden Personen wurde bereits im Kapitel 2 behandelt, sodass im Katalog darauf nicht eingegangen wird.

Geodätische Strukturen von Richard Buckminster Fuller aus GFK: Radome 1954

Lage: erstes Radome Mt. Washington, USA; weitere weltweit

Jahr: Einreichung zum Patent durch Buckminster Fuller 1951, Patenterteilung 1954, erstes Radom geod. Teilung Mt. Washington 1954

Standdauer: bis heute

Gebäudetyp: Schutzhülle, Dom, Versammlungsstätte

Ausführung: mehrmalige Ausführung an versch. Orten

Bauberr: U.S. Marine Corps und andere

Entwurf: R. Buckminster Fuller

ausführende Firma: Lincoln Laboratory u.a.

Tragwerkstyp: Kuppelschale oder Rippenschale oder Netzwerkkuppel, D = 18 bis 35 m

Bibliographie:

- Bau einer großen Radar-Kuppel aus Glasfaser-Polyesterharz. In: *Kunststoffe* Heft 11 (1960), S. 651
- Büttner, Oskar; Hampe, Erhard: *Bauwerke Tragwerke Tragstruktur - Band 2*. 1. Aufl. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1984
- Dietz, Albert G.H.: Better Buildings with Plastics. In: *Modern Plastics* Nummer 6 (1955), S. 85-90
- Dietz, Albert G. H.: *Kunststoffe in tragenden Konstruktionen*. Internationales Symposium „Kunststoffe im Bauwesen“, Rotterdam : 1970
- Doernach, Rudolf: *ika '72 - 2. Internationale Kunststoff-Haus-Ausstellung der Welt*. Lüdenschied : 1972, S. 31. - Ausstellungskatalog
- Doernach, Rudolf: *Bausysteme mit Kunststoffen*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1974
- Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten - Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005
- Geodesic Dome. In: *Modern Plastics* September (1954), S. 162
- <http://www.bfi.org/gallery/FlyEyeDome>
- <http://www.salsburg.com/geod/monohex.html>
- <http://www.solwaygallery.com/Pages/twelve.html>
- <http://www.bfi.org/gallery/FlyEyeDome>
- http://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Buckminster_Fuller
- <http://www.db.bauzeitung.de/sixcms/media.php/273/buckminsterfuller.pdf>
- <http://www.radome.net>
- <http://www.radomes.com>
- Jackson, Lesley: *the sixties*. London : Phaidon Press, 2000
- Klotz, Heinrich: *Vision der Moderne*. München : Prestel Verlag, 1986
- Krause, Joachim; Lichtenstein, Claude: *Your Private Sky - R. Buckminster Fuller*. Baden : Lars Müller Verlag, 1999
- Makowski, Z.S.: l'emploi des matières plastiques comme éléments structuraux dans le bâtiment. In: *Plastiques Batiment* Heft 119/120 (1968), S. 11-17
- McHale, John: Les Structures de Buckminster Fuller. in *L'architecture d'aujourd'hui* Heft 1 (1961/62), S. 50-55
- Meikle, Jeffrey L.: *American Plastic - A Cultural History*. New Brunswick und New Jersey : Rutgers University Press, 1995
- Nerdinger, Winfried: *Konstruktion und Raum in der Architektur des 20. Jahrhunderts*. München : Prestel Verlag, 2002
- Rühle, Herrmann: *Räumliche Dachtragwerke*. Band 2. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1970
- Saechting, Hansjürgen: Das Haus aus Kunststoff - ein Traumhaus von morgen? in *Kunststoffe* Heft 1 (1957), S. 19-22
- Saechting, Hansjürgen: *Bauen mit Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 1973
- Schlauch, Jörg, Heinle, Erwin: *Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1996
- Skeist, Irving: *Plastics in Building*. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1966
- Tomorrow's Barn. In: *Modern Plastics* Nummer 6 (1955), S. 92-93
- The BIGGEST Thing in Plastics. In: *Modern Plastics* Oktober (1955), S. 98-99
- The Estate of R. Buckminster Fuller

Zustandekommen des Projektes:

Buckminster Fullers Untersuchungen zur geeigneten Teilung der Oberfläche einer Kugel in möglichst gleiche Elemente mündeten in der geodätischen Teilung. Das von der Projektion eines Ikosaeders auf die Innenfläche der Kugel abgeleitete Prinzip wird 1951 von Fuller zum Patent angemeldet und 1954 erteilt. Im selben Jahr ergibt sich die Möglichkeit, dieses Prinzip erstmals für den Bau einer Kuppel mit FVK einzusetzen (Radom Mt. Washington) *Dietz (1955)*. In der Folge werden weitere Radome mit FVK in der Tragstruktur gebaut. Bis heute sind etwa 300 000 geodätische Kuppeln auf der Welt errichtet worden. Infolge der Anforderung an eine Radarstation (metallfreie Konstruktion, tragend und raumabschließend, Konstruktion den Schwenkradius einer Antenne umschließend) eignete sich FVK hervorragend für diese Anwendung, was den Radomen eine serielle Anwendung beschied. Die Überkuppelung der Ford-Rotunde in Dearborn 1954 durch Buckminster Fuller war zwar die erste Idee, FVK tragend einzusetzen, konnte aber nicht realisiert werden, da man das glasfaserverstärkte Polyesterharz noch nicht in der erforderlichen Qualität produzieren konnte *Krause (1999), 359*.

Tragwerk:

Fuller verwendete unterschiedliche Konstruktionsprinzipien der geodätischen Kuppeln mit unterschiedlichem Tragverhalten:

A) Netzwerkkuppel: Die durch Projektion und Teilung erhaltenen Stäbe sind die tragende Struktur. Die nichttragenden Dreiecke dienen der Stabilisierung der Stäbe.

B) Rippenkuppel: Stäbe und Flächen tragen gemeinsam.

C) Kuppelschale: Die Flächen allein bilden die Tragstruktur. Dies kommt dem Tragverhalten einer Schale sehr nahe (besonders wenn sie gekrümmt sind). Alle Radome nutzen dieses Tragprinzip.

Alle unter A bis C aufgeführten Tragwerke sind von Fuller sowohl einlagig aus GFK (für kleine Durchmesser) als auch doppelagig (Stützkernkonstruktion) oder räumlich hergestellt worden. Bei den räumlichen Strukturen wird die äußere Lage von Stäben und die innere von Flächen gebildet.

statische Berechnung, Berechnungsverfahren:

Über die statische Berechnung oder das Berechnungsverfahren ist nichts bekannt.

Material:

Bei den Radomen benutzt Fuller Plattenelemente aus mattenverstärktem Fiberglas (glasfaserverstärktes Polyester) und Stäbe aus gewebeverstärktem Fiberglas. Andere Dome haben Platten aus glasfaserverstärktem Epoxidharz, was eine größere Transparenz ermöglicht *The Biggest Thing (1955)*. Über den Anteil der Glasfasern sowie die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Kunststoffe ist nichts bekannt.

Herstellung:

Die ersten Radome wurden von dem amerikanischen Hersteller Universal Molded Products Corp. in Bristol, Virginia als Pilotprojekte für militärische Zwecke hergestellt. Später wurden eine Reihe von Radomen durch die Firma Lunn Laminates, Inc. im Handauflegeverfahren (Vakuumsackverfahren) produziert. Die Elemente wurden durch eine spezielle Neoprendichtung von Pawling Rubber Co. abgedichtet *The Biggest Thing (1955)*.

Während in den 1950er Jahren größere Radome über 45 m Höhe mit Rippen aus Metall, später aus GFK gefertigt wurden (Tragwerkstyp A) *Jackson (2000)*, werden heute die Elemente in einem Stück ohne Stöße und Nähte inklusive der Flansche vollständig aus GFK mit Epoxidharz laminiert www.radome.net. Die Flansche sind 6 mm dick und 75 mm bzw. 120 mm hoch *Rühle (1970)*. Die Flansche werden durch Aluminiumbolzen mit Gegenmuttern untereinander verschraubt.



Abb. A1 (oben)
Aufbau eines Radomes in den USA, Schliessen des Deckels
www.radomes.com
Abb. A2 (unten)
Radom in den USA, 1955 *The Biggest Thing (1955)*



Abb. A3
Aufbau des Radomes von Abb. A2 www.radomes.com

Geodätische Strukturen von Richard Buckminster Fuller Fuller aus GFK: Fly's Eye/Monohex 1965

Lage: versch. Standorte in den USA

Jahr: Einreichung zum Patent durch Buckminster Fuller 1961, Patenterteilung 1965,

Entwurf 1965, Realisierung durch John Warren 1965

Standdauer: bis heute

Gebäudetyp: Schutzhülle, Dom

Ausführung: mehrmalige Ausführung an versch. Orten

Bauherr: R. Buckminster Fuller

Entwurf: R. Buckminster Fuller

ausführende Firma: John Kuitik

Tragwerkstyp: Kuppelschale mit Störungen, drei Größen: 12 Fuß (3,66 m), 26 Fuß (7,92 m) und 50 Fuß (15,24 m) im Durchmesser

Bibliographie:

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005

<http://www.salsburg.com/geod/monohex.html>

<http://www.bfi.org/gallery/FlyEyeDome>

The Estate of R. Buckminster Fuller

Zustandekommen des Projektes:

Bei den im Patent als Monohex bezeichneten Strukturen handelt es sich um eine Weiterentwicklung des geodätischen Prinzips. Fuller lässt sich sowohl eine bestimmte Teilung einer Kugeloberfläche patentieren als auch dessen Konstruktion. Das Prinzip ist anwendbar auf verschiedene Materialien, darunter GFK. In jedem Fall wird eine Kuppel in identische Elemente zerlegt, die transportabel und leicht (ohne Kran von Hand) im Zusammenbau sind.

Tragwerk:

Geteilte Kuppelschale mit Störungen, überwiegend Membrankraftverteilung

Fügung der Einzelteile: entweder mit überlappendem Steg oder mit Randaufkantung (sh. Abb. 87, 88)

statische Berechnung, Berechnungsverfahren:

Über die statische Berechnung oder das Berechnungsverfahren ist nichts bekannt.

Herstellung:

Eine geplante Serienproduktion konnte nicht realisiert werden. Alle Teile wurden von John Kuitik im Handlaminierverfahren gefertigt. Der Prototyp des 26-Fuß-Domes (7,92 m) wurde im Jahr 2002 von 25 Mitgliedern des BFI und Helfern auf dem privaten Grundstück von Neal Katz (Mitglied des BFI) innerhalb eines Tages aufgestellt. Er wird als Musikpavillon und Versammlungsraum genutzt www.bfi.org.

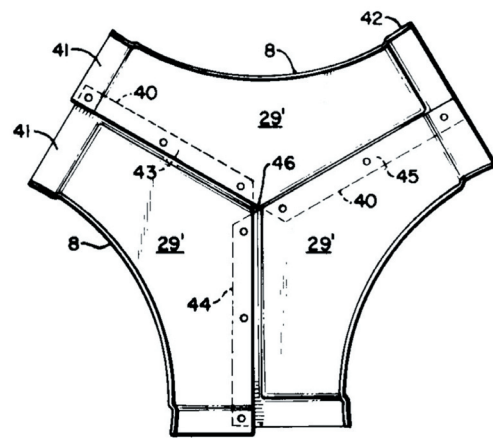
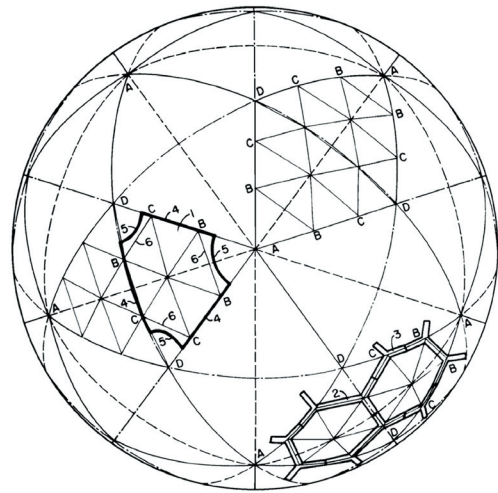


Abb. A4 und A5 (oben)

Monohex, Patentschrift www.salsburg.com

Abb. A6 (unten links) und A7 (unten rechts)

Fly's Eye im Rohbau und im Aufbau, Sebastopol, USA 2002
www.bfi.org



Monsanto House of the Future

Lage: Prototyp ausgestellt im Disneypark 1957-1967, Kalifornien, USA
Jahr: Idee der Monsanto Chemical Comp.: 1954, Entwicklung des Prototypen am M.I.T.: 1954-1957,
Standdauer: Einweihung Juni 1957, Standzeit bis 1967, abgerissen
Gebäudetyp: mobiles Wohnhaus mit 120 m² WFL
Ausführung: ein Prototyp
Bauherr: Monsanto Chemical Comp. und Walt Disney, USA
Architekt/Ingenieur: sh. Projektteam
ausführende Firma: Monsanto Chemical Comp., USA
Tragwerkstyp: biegebeanspruchte Schale/Kragträger: schalenförmige Elemente (Flügel) werden kreuzweise an einen Betonkern angehängt, Auskragung 4,80 m, Höhe Auskragung 4,0 m
 Schalenaufbau: Kastenträger (d = 32 bzw. 62 mm) mit oberem und unterem Sandwich-Element (d = 9 bzw. 11,5 mm); Deckschichten 7,5 mm GFK, Kern 75 bzw. 100 mm PUR-Hartschaum

Bibliographie:

Anteil des Fertigbaus 1967. In: *Architektur & Wohnform* Heft 8 (1968), S. 231
 Atkins, Mark: *House of the Future brochure*. 1960s version, - Werbebroschüre
 Balkowski, D.: Das Kunststoffhaus als Konstruktionsform. In: *db deutsche bauzeitung* Heft 14 (1962), S. 118
 Beyer, W.: Glasfaserkunststoffe für die Bautechnik: Kennwerte für GFK. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1956), S. 591
 Boller, K.H.: *Effects of Long-Term Loading on Glass-Fiber-Reinforced Plastic Laminates*. New York: Reinforced Plastics Division, Society of the Plastic Industry: 1956. - Proceedings
 Heid, G.; Seifert, T.: *Untersuchungen und Entwicklungen einer Montagebauart unter Verwendung von Kunststoffen und Kunststoffelementen – Teil 1: Vergleichende Untersuchungen*. im Auftrage des Bundesministeriums für Wohnungsbau unter Mitwirkung des Institutes für Bauforschung e.V.: Hannover, 1959
 In: *Modern Plastics* April (1951), S. 87
 In: *Plastic Industrie* Oktober (1953), S. 27
 Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; Whittier M.R.P.; Gigliotti, M.F. u.a.: *Final Report – Engineering Analysis and Structural Design of the Monsanto House of the Future*. M.I.T. Engineering Department und Monsanto Chemical Company, Plastics Division: 1957
 Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; R.W.; Goody, M.; Whittier M.R.P.: Engineering the House of the Future – Part 1. In: *Modern Plastics* Juni (1957), S. 143
 Dietz, A.G.H.; Goody, M.; Heger, F.J.; McGarry, F.J.; Whittier, M.F.: Engineering the House of the Future – Part 2. In: *Modern Plastics* Juli (1957), S. 119
 Dietz, Albert G. H.: *Plastics for Architects and Builders*. London: M.I.T. Press, 1969
 Doernach, Rudolf: *Bausysteme mit Kunststoffen*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1974, Bildrechte: Rudolf Doernach
 Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar: Universitätsverlag, 2005
<http://www.plasticliving.com/hotf/Ehtml>
http://members.aol.com/diziago/HOTF_brochure.html
 Ludwig, Matthias: *Mobile Architektur*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1998
 Meikle, Jeffrey L.: *American Plastic – A Cultural History*. New Brunswick und New Jersey: Rutgers University Press, 1995
 Meyer-Bohe, Walter: das Einfamilienhaus im Zeitalter der Vorfertigung. In: *Architektur & Wohnform* Heft 4 (1966), S. 299
 Monsanto – *Home of the Future*. State Film Productions, Inc.: Werbefilm, USA, 1957
 Monsanto-Haus. In: *Bauen und Wohnen* Heft 7 (1959), S. 240-242
 Monsanto Chemical Company: *Monsanto Magazin March 1968*. In: IBK Bibliothek, Sammlung SL 1121. Ludwigshafen, 2004, - Archivmaterial
 Plastics: technical prospects and architectural imagery. In: *Architectural Review* Heft 8/9 (1965), S. 394
 Quarmby, Arthur: *The Plastics Architect*. London: Pall Mall Press, 1974
 Rüdener, A.C., Frenz, R.: *Kunststoffe in der Hand des Architekten*. Stuttgart: Verlag Berliner Union, 1962
 Saechting, Hansjürgen: Das Haus aus Kunststoff – ein Traumhaus von morgen? In: *Kunststoffe* Band 47, Heft 1 (1957), S. 19-22
 Saechting, Hansjürgen: *Bauen mit Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, 1973
 Schwabe, Amtor: Was fängt der Architekt mit den Kunststoffen an? In: *baukunst und werkform* Heft 5 (1953) S. 242-249
 Schwabe, A., Saechting, H.: *Bauen mit Kunststoffen*. Berlin: Ullstein-Fachverlag, 1959
 Schwabe, Amtor: Kleines ABC zum Bauen mit Kunststoffen. In: *Bau-Market* Nummer 42, Oktober (1959), S. 1603-1610
 Umschau aus Schrifttum und Technik. In: *Kunststoffe* Heft 2 (1954), S. 66
 Wagenführ, Horst: Wie wird im Jahre 2000 gebaut? In: *Der Architekt* Heft 12 (1972), S. A 544 – A 548

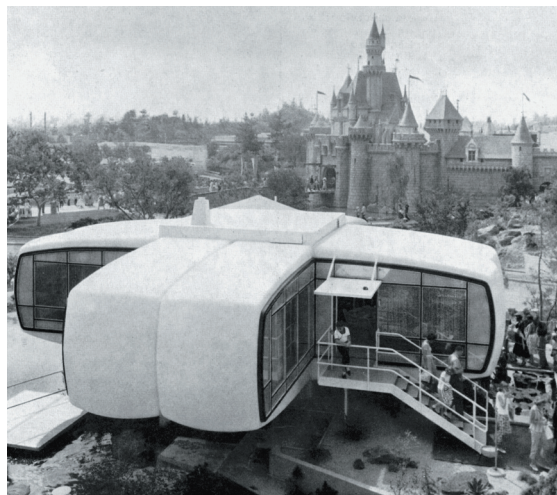


Abb. A8
 Monsanto House of the Future, aufgestellt im Disneypark von 1957 bis 1967 *Monsanto-Haus (1959)*

Zustandekommen des Projektes:

Das Projekt basiert auf den Intentionen der Fa. Monsanto Chemical Comp., ein Wohnhaus für den amerikanischen Baumarkt serienreif zu entwickeln. Das Haus wurde von einem Projektteam (Hauptverantwortliche mit Sitz am M.I.T.) entwickelt. Man begann mit einer Analyse des bestehenden Wohnungsmarktes und mit einer Herausarbeitung der Bedürfnisse einer amerikanischen Familie mit modernen Lebensformen an ein Wohnhaus. Die Ergebnisse wurden in der Studie „Plastics in Housing“ veröffentlicht und hatten direkten Einfluss auf die Architektur und folgend auf die Tragkonstruktion des Gebäudes.

Projektteam, welches zwischen 1955 und 1957 den Prototypen entwarf, plante und realisierte:

Projektteam Ingenieure: Dietz, *Final Report (1957a)*

Robert P. Whittier, former project engineer/manager, Plastic Division Monsanto Chemical Co., Springfield, Mass. *Dietz u.a. (Juni/Juli 1957), 143*

C. H. Adams, R.J. Bourke, L.A. Contini, M. F. Gigliotti, R.F. Hansen, G.P. Harris, R. E. Kamp, T.J. Martin, J.S. Nelson

Architekten: Dietz, Final Report (1957a)

Marvin E. Goody, Hamilton & Goody, Architects, Cambridge, Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143

Richard W. Hamilton, Hamilton & Goody, Architects, Cambridge, Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143

Ernest Kirwin, former project architect, M.I.T.

Konsultierte Ingenieure Dietz, Final Report (1957a)

Albert G.H. Dietz, Prof. of Building Engineering and Construction and Chairman of Pastics Committee, Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.), Cambridge, Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143

Frank J. Heger Jun., Assistant Professor of Structural Design, M.I.T., Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143
und Simpson Gumpertz & Heger Inc., Consulting Engineers, Cambridge, Mass. Skeist (1966), 119

F.J. McGarry, Assistant Professor of Materials, M.I.T., Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143

Umfeld (Herstellung anderer Bauten mit FVK):

Richard E. Chambers, Assistant Professor of Structural Design, M.I.T., Mass. Dietz u.a. (Juni, Juli 1957), 143

und Simpson Gumpertz & Heger Inc., Consulting Engineers, Cambridge, Mass. Skeist (1966), 119

Tragwerk: Dietz, Final Report (1957a)

Das Gebäude besitzt ein Sockelgeschoss und ein Obergeschoss.

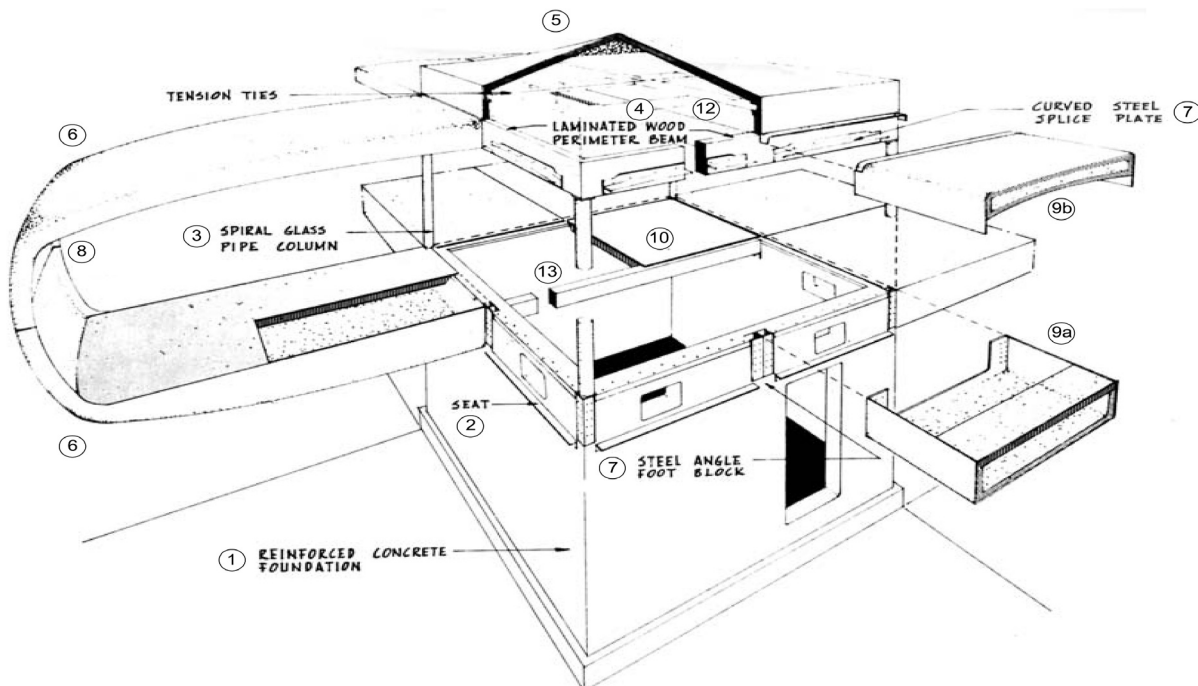
Primärstruktur: Der Gebäudekern besteht aus einem Stahlbeton-Trog (4,88 m × 4,88 m), der von der Bodenplatte bis zur Oberkante des Sockelgeschosses reicht. Im Obergeschoss wird dieser Querschnitt aufgelöst in vier Stahlbetonstützen, die in den Achsen der Trokecken verlaufen. Den Abschluss des Obergeschosses bildet ein umlaufender BSH-Träger (4), der gleichzeitig als Zugring für die angehängten Kunststoffschalen fungiert sowie eine Deckenplatte (11). Den Dachabschluss bildet ein flaches Pyramidendach aus vier hyperbolischen GFK-Flächen (5).

Im Obergeschoss bilden vier biegebeanspruchte Schalenteile sowohl die Raumhülle als auch die Tragkonstruktion. Jeder der vier Schalenflügel ist längs einmal geteilt. Ebenso ist der Schalenflügel in der Mitte der vertikalen Fläche geteilt, es entsteht eine Fuge (falls die Schalenteile nicht verbunden werden) oder ein Gelenk (falls die Schalenteile verbunden werden). Nach mehreren Entwicklungsstadien entschied man sich für ein Gelenk (8).

Das Tragwerk der Flügel (6) sind ein oberer und ein unterer Kragträger, die aufgrund der hohen Beanspruchungen als Kastenträger konstruiert wurden. Der Kastenträger wird gebildet von je einer oberen und einer unteren Stützkernplatte, die an den Rändern mit Stegen versteift sind. In der Primärstruktur tragen die Flügel wie hohe aufgelöste Biegeträger (oben Zug, unten Druck). Die Zugkräfte der oberen Flügelteile werden über den BSH-Trägerrost (4) in eine den Kern abdeckende Stützkernplatte übertragen und gleichen sich bei symmetrischer Belastung aus. Das Anschlussdetail (AD 1) ist in Abb. 79 dargestellt. Die Druckkräfte der unteren Flügelteile werden adäquat über den oberen Rand des Betonkerns sowie einen BSH-Trägerrost (13) auf die Fußbodenplatte (10) übertragen (Detail AD2 sh. Abb. 80).

Sekundärstruktur: Die Kastenträger werden in Flügelquerrichtung auf Biegung B beansprucht. Es ergeben sich folgende Beanspruchungen aus Eigengewicht und beweglicher Last:

Die Fußbodenplatte ist eine Art Nebenträger. Sie trägt als Platte auf zwei Stützen, Stützen sind die hohen Stege. Da die Fußbodenplatte auch Teil des Primärtragwerkes ist, entsteht in Längsrichtung des Flügels eine Druckbelastung C. Sie ist nicht gleichmäßig über die Breite des Flügels verteilt, sondern nimmt von der Mittellinie des Flügels zum Steg (steifste Stelle) hin zu. Die Stege stehen unter Schubspannung. Man kann es auch so betrachten, dass die Hauptlast von den Stegen getragen wird,



die Sandwichplatten oben und unten sind mittragende Flansche und bekommen aus dieser Funktion eine Schubverformung T. Diese mittragende Wirkung lässt sich für nichtisotrope Materialien wie Kunststoffe leider schwer bestimmen. Sie wurde eher aus den vielfältigen Versuchen gewonnen. Die Stahlbetonstützen tragen nur Vertikallasten.

statische Berechnung, Berechnungsverfahren: Dietz, Final Report (1957a)

Belastungen:

Eigenlasten:

$$\begin{aligned} g_{\text{Flügel}} &= 0,49 \text{ kN/m}^2 \text{ [Heid (1959)], [Dietz (06/1957)], [Dietz, Final Report (1957)]} \\ &\quad \text{(Dach und Bodensegmente)} \\ g_{\text{Boden, zentr. Raum}} &= 0,73 \text{ kN/m}^2 \text{ [Heid (1959)], [Dietz (06/1957)]} \\ g_{\text{Dach, zentr. Raum}} &= 0,98 \text{ kN/m}^2 \text{ [Dietz, Final Report (1957)] (inkl. Ausstattung)} \end{aligned}$$

Bewegliche Lasten:

$$\begin{aligned} P_{\text{Boden, Ausbau}} &= 2,50 \text{ kN/m}^2 \text{ [Heid (1959)], inkl. Ausbau)} \\ P_{\text{Dach}} &= 1,45 \text{ kN/m}^2 \text{ [Schwabe (1959)]} \\ s_0 &= 1,95 \text{ kN/m}^2 \text{ [Dietz, Final Report (1957)]} \end{aligned}$$

Wind: für eine Windgeschwindigkeit in der Gegend um L.A. 145 km/h

$$w_D = 1,22 \text{ kN/m}^2 \text{ [Dietz, Final Report (1957)] erhöht um 25\%, weil es ein}$$

Erdbebengefährdetes Gebiet ist

$$w_{\text{sog, Dach}} = 0,60 \text{ kN/m}^2 \text{ [Dietz, Final Report (1957)]}$$

Erdbeben: Erdbebenzone 3. Ordnung, Bemessung für max. Schubspannungen von ca. 13 % des Eigengewichtes.

Diese Schubspannungen entsprechen ca. 20-25 % der Windbelastung und müssen zu dieser hinzugerechnet werden, da Erdbeben in Verbindung mit starkem Sturm auftreten können.

$$w_{\text{Erdbeben}} = 1,56 \text{ kN/m}^2 \text{ [MO 16]}$$

Lastkombinationen:

- I voll g+p in zwei gegenüberliegenden Flügeln
- II voll g+p alle Flügel
- III voll p eine Flügel
- IV g alle Flügel, p in drei Flügeln
- V volle Temperatur und g
- VI volle Temperatur und g+p alle Flügel
- VII Windsog alle Flügel und g

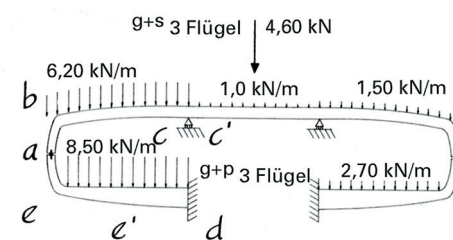


Abb. A 10

maßgebende Lastkombination IV für die Bemessung Dietz (1957a)

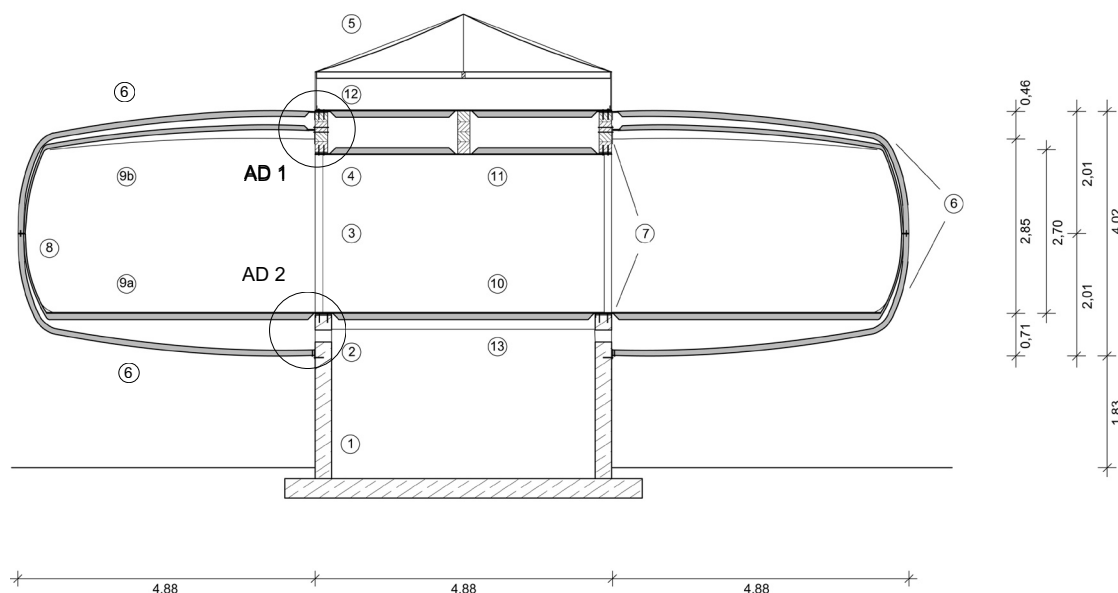
Abb. A9 (gegenüber links)

Monsanto House of the Future, Axometrie Dietz (1970)

Abb. A 11 Monsanto House of the Future, Schnitt

Schnitt:

- 1 Basis, der Keller aus Stahlbeton
- 2 Druckring, mit Öffnungen für Luftzirkulation der Klimaanlage
- 3 Stützen für Decke und Dach, GFK
- 4 Zugring aus BSH-Trägern
- 5 Dach aus 4 hyperbolischen Flächen, GFK
- 6 identische Dach- und Bodenschale der Hausflügel
- 7 Verbindungspunkte Flügel Druck- oder Zugring
- 8 Bolzen
- 9 innerer Raumabschluß
- 9a Bodensandwich
- 9b Deckenschale, ein gekrümmtes Sandwich
- 10 Fußboden im Zentralbereich
- 11 Decke im Zentralbereich, 2 Sandwichs
- 12 BSH-Trägerrost zur Aussteifung des Druckringes
- 13 BSH-Trägerrost zur Aussteifung des Zugringes



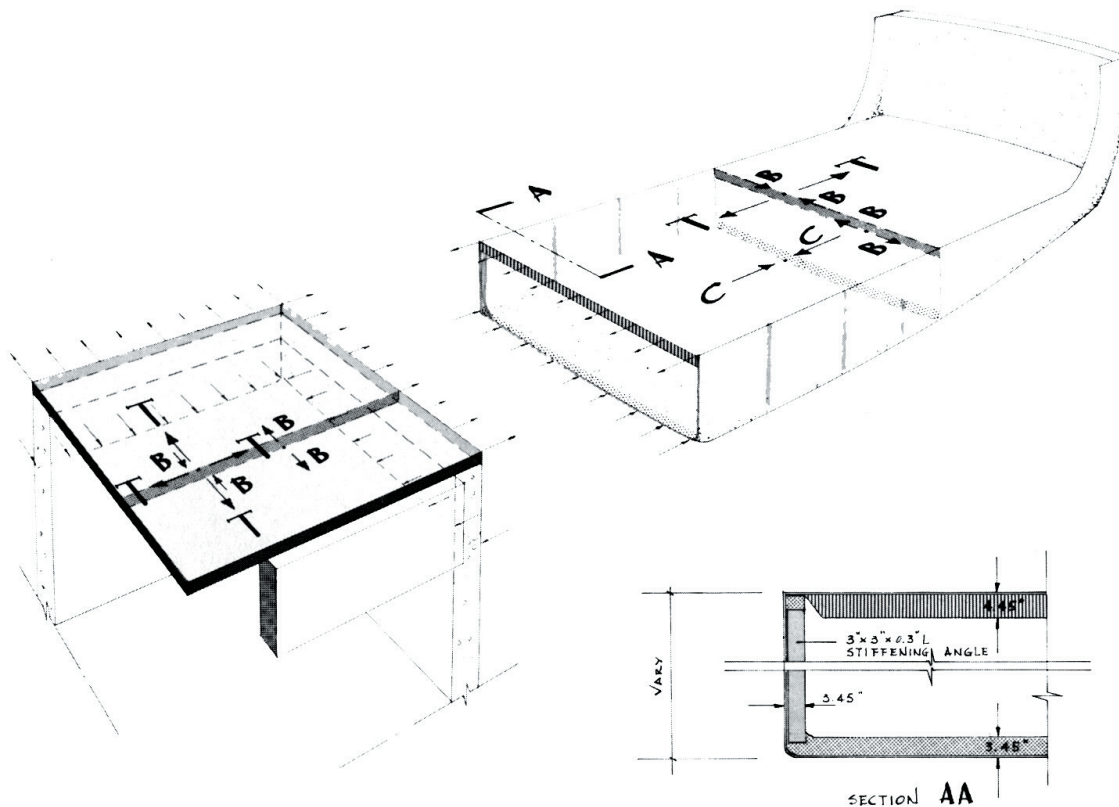


Abb. A 12 prinzipielle Kräfte im unteren Flügel Dietz (1957a)

Spannungen:

Die Ingenieure ermittelten aus den Lastkombinationen die Hauptspannungen für das System. Das System ist so konstruiert, dass fast überall Schubspannungen auftreten, die Längsnormalspannungen sind sowohl Zug als auch Druck. Für die Druckbeanspruchung ist die doppelte Krümmung der Sandwichelemente ausreichend gegen Beulen.

Die wirkenden Kräfte und Spannungen im System sind

max $M = 42 \text{ kNm}$, zug. $N = 9,4 \text{ kN}$, zug. $Q = 26 \text{ kN}$,

max. Normalspannung Zug $= 0,95 \text{ kN/cm}^2$ (aus Versuch 0,69) aus Eigenlast und ungünstig angesetzter Verkehrslast,

max. Normalspannung Druck $= 0,92 \text{ kN/cm}^2$ (aus Versuch 0,48) aus Eigenlast und Temperatur,

max. Schubspannung $= 0,40 \text{ kN/cm}^2$ (aus Versuch 0,23) aus Eigenlast und Verkehr

max. Biegespannung $= 0,92 \text{ kN/cm}^2$ aus der Plattenbeanspruchung wie folgt:

Für eine kreuzweise gespannte Platte mit den Abmessungen $2,40 \text{ m} \times 4,80 \text{ m}$ und dem Seitenverhältnis 1:2 ergibt sich das maximale Moment für die kurze Spannweite mit $q = g + p = 0,49 + 2,50 \text{ kN/m}^2$ zu $\max M = q \times l^2 / 9,3 = 2,99 \times 2,40^2 / 9,3 = 1,85 \text{ kNm}$

und das Trägheitsmoment wird

$$I = I_{y1} + I_{y2} + A_1 \times z_1^2 + A_2 \times z_2^2$$

$$I = \sim 0 + \sim 0 + [(0,75 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}) \times 5,4^2 \text{ cm}^2] \times 2$$

$$I = 4374 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_B = N/A + M/I \times z = 0,69 + 185 / 4374 \times 5,4 = 0,92 \text{ kN/cm}^2$$

Diese Werte werden den zulässigen gegenübergestellt. Sie ergeben sich aus 25 % der gemessenen Kurzzeitfestigkeit.

$$\text{Biegefestigkeit} = 0,25 \times 24 \text{ kN/cm}^2 = 6,0 \text{ kN/cm}^2$$

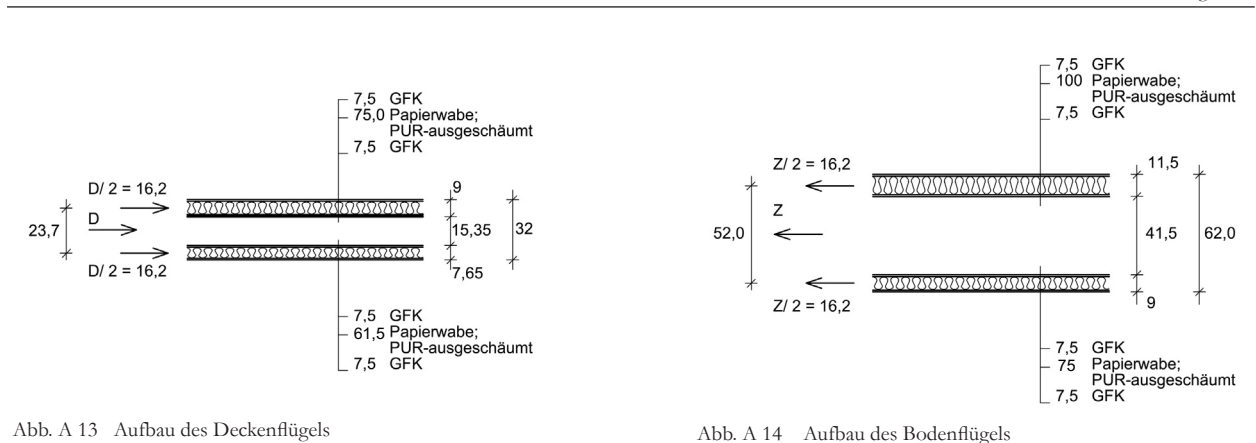
$$\text{Druckfestigkeit} = 0,25 \times 14 \text{ kN/cm}^2 = 3,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Zugfestigkeit} = 0,25 \times 21 \text{ kN/cm}^2 = 5,25 \text{ kN/cm}^2$$

Die Festigkeiten des Materials werden nur zu einem geringen Teil ausgelastet. Das Problem der Konstruktion bestand nicht in der Erreichung hoher Festigkeiten, sondern hoher Stabilität.

Ermittlung der Materialkennwerte: Dietz, Final Report (1957a)

Es wurden mehrere Testserien mit verschiedenen Harzen und verschiedenen Fasereinlagen (Bindung, Fasergehalt, Fasermaterial) gefahren. Im Ergebnis stand folgendes Material:



Mit dem endgültigen Material wurden Bolzenverbindungen getestet und ausgewählt. Die nachfolgende Übersicht zeigt die getesteten und gewählten (fett) Verbindungen.

Herstellung:

Vakuumsackverfahren: Handlaminierverfahren, für 10 Schichten Glasfasergewebe benötigten 3 Arbeiter 8 Stunden für die 12 m² großen Teile. Nach dem Laminieren wurde das Harz gleichmäßig durch Vakuumdruck auf die Form gedrückt, in 2 ½ Stunden bei 80-90 °C härtete es vollständig aus.

Herstellung der Form: Eine Holzform diente als Positivform, davon wurde eine Negativschalung abgenommen. Sie bestand aus Polyesterharz und Glasfasern, mit einem Wabenkern aus Karton (Wabensandwich).

Herstellung aller Teile durch die Winner Manufacturing Company in Trenton, einer Bootswerft in New Jersey innerhalb von 3 Monaten. Die Werft hatte bereits Erfahrungen in der Serienproduktion von Womb Chairs von Saarinen für Knoll Associates.

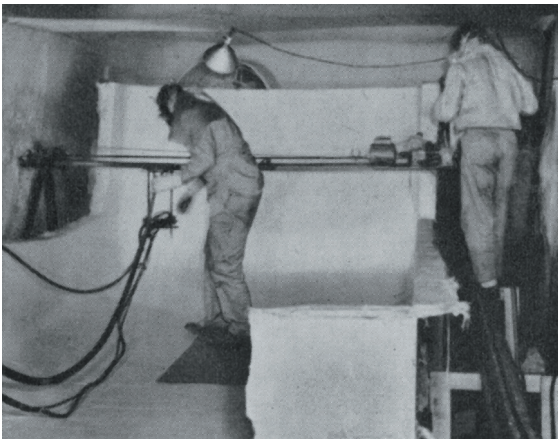
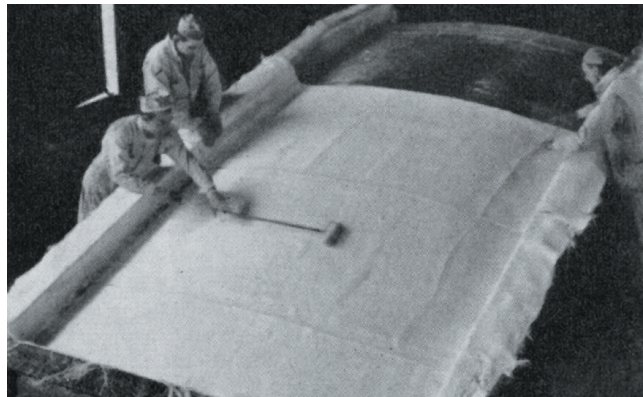
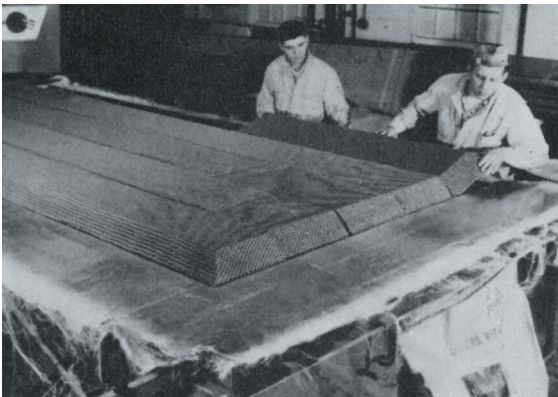


Abb. A 15, A 16 und A 17
Herstellung der Teile für das Monsanto House of the Future in einer
Bootswerft in New Jersey
Monsanto Haus (1959)

Tankstelle Thun

Lage: Thun, Schweiz

Jahr: 1960

Standdauer: bis heute (2005)

Gebäudetyp: Überdachung einer freien Fläche, Platzüberdachung

Ausführung: einmalige Ausführung, andere Projekte vom gleichen Tragwerkstyp und Herstellung

Bauherr: Moser (CH)

Ingenieur: Heinz Isler, Burgdorf (CH)

ausführende Firma: nicht bekannt, evt. CIBA

Tragwerkstyp: kreuzweise gespannte Platte, max Spannweite 9 m,

Stützkernkonstruktion d = 50 cm; Deckschichten 3 mm GFK (25 %

Wirrfasermatte, Palatal), Kern aus vorgefertigten Würfeln GFK (25 %

Wirrfasermatte, Palatal), in den Stegen 40% Glasfasermatte

Bibliographie:

Genzel, Elke; Pamela Voigt (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-

Universität Weimar, FOMEKK) (24.09.2002, 13:00-16:00 MEZ): Gespräch mit Heinz Isler

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005

Isler, Heinz: Schalenkonstruktionen. In: *Bauen + Wohnen* Heft 6 (1968), S. 197-203

Isler, Heinz: *Kunststoffe für tragende Bauteile* - Vortrag SIA Fachgruppe, Burgdorf : 1975, - Schriftenreihe

Isler, Heinz: Tragende Bauteile aus Kunststoff: Anwendungsbeispiele. In: *Schweizer Bauzeitung* Heft 11 (1977), S. 13-20

Isler, Heinz: Erfahrungen mit selbsttragenden Kassettenplatten aus GF-UP. In *plasticconstruction* Heft 3 (1977), S. 118-122

Isler, Heinz: *Newer Structures in Plastic Materials*. Burgdorf : 1984, unv. Archivmaterial

Isler, Heinz: Geschichte und Entwicklung der Schalenkonstruktionen – I. Internationales Symposium des SFB 230. Natürliche Konstruktionen – *Mitteilungen des SFB* Heft 3, September, 1988

Isler, Heinz: *Spiel ohne Grenzen*. Sonderdruck aus Beiträge zur Geschichte des Bauingenieurwesens 12, Ingenieurarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Baukonstruktion: Juli 2002

Isler, Heinz: Archivmaterial, Burgdorf, 2002

Isler, Heinz: Eduardo Torroja and the IASS, The international Association for shell structures. In: Eduardo Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of Building. *International Seminar Politecnico Torino*. Milano: FrancoAngeli, 2003

Polónyi, S.: Schalen in Beton und Kunststoff. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag, 1970

Schunk, Eberhard: Ingenieurporträt Heinz Isler - Bauingenieur und bildender Künstler. In: *db deutsche bauzeitung* Heft 4 (2003), Seite 90-95



Abb. A 18

Untersicht der Tankstelle Thun Polónyi (1970)

Zustandekommen des Projektes:

Es ist nicht bekannt, ob die Fa. Moser Heinz Isler angesprochen hatte, um die Überdachung der geplanten Tankstelle mit einer 320 m² großen Platte zu realisieren. Isler hatte jedoch mit der Herstellung und Konstruktion von solchen Stützkernplatten bereits Erfahrungen gesammelt. 1959 realisierte er eine Platte für ein Wochenendhaus aus einem Stück von 4,50 × 9 m Isler (1975), 6.

Tragwerk:

Es handelt sich um eine punktgestützte Platte auf eingespannten Stützen.

Maße:	14,0 m × 22,50 m
Spannweite:	max. 14,00 m
Dicke:	d = 50 cm
einzelne Würfel:	50 × 50 × 25 cm, in zwei Lagen je 29 × 44 = 1276, gesamt 2552 Stück
Gewicht:	42 kg/m ²
Material:	GUP
Belastung:	Eigenlast (23 kg/m ²) + Schneelast (130 kg/m ²)
Aussteifung:	eingespannte Stützen

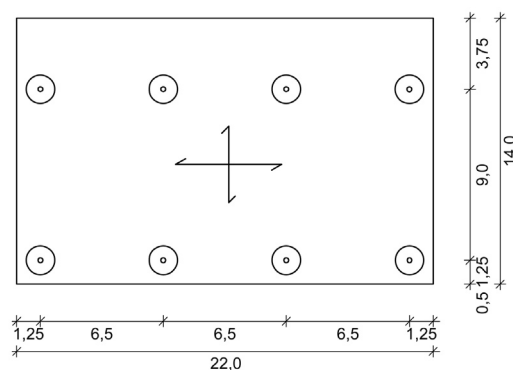
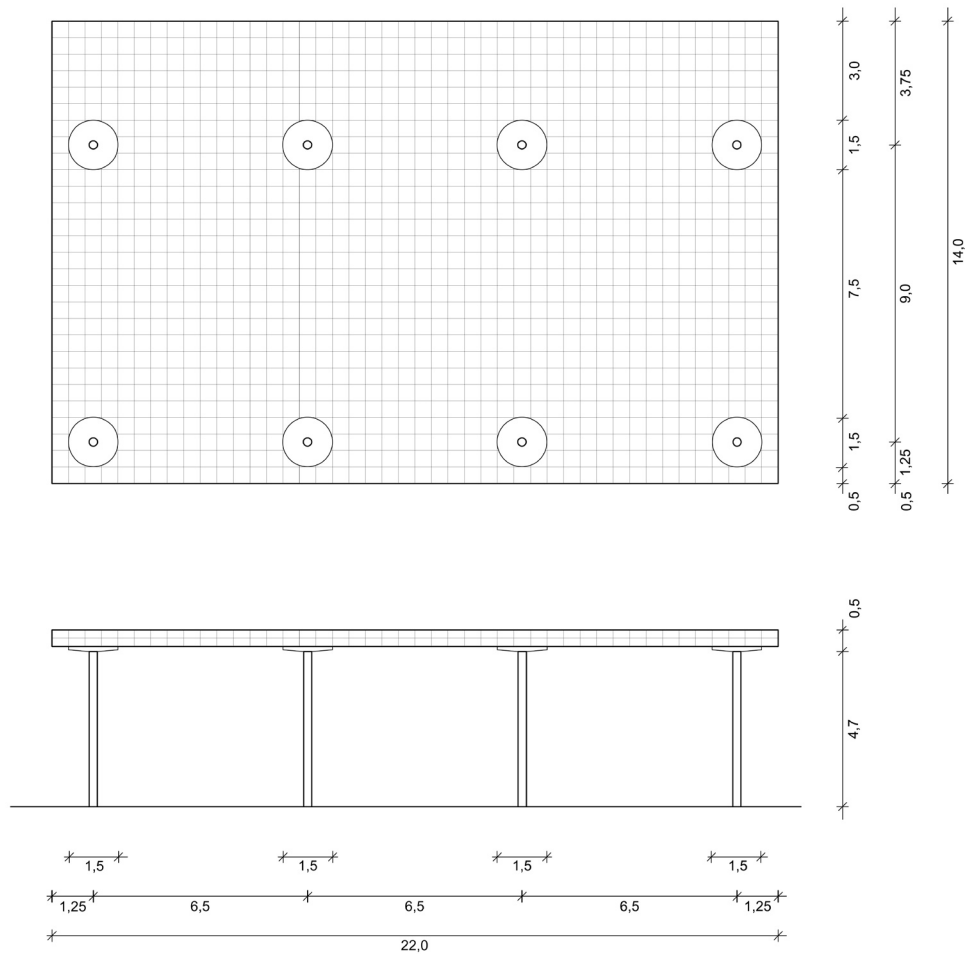


Abb. A 19

statisches System der Tankstelle Thun

statische Berechnung:

Eine statische Berechnung konnte nicht eingesehen werden. Die Platte ist biegebeansprucht und wird über das Stabilitätsproblem, also das Ausbeulen der Deckschichten und Stege bemessen. Die kritischen Bereiche der Sandwichplatte sind die inneren Querwände und die Bereiche, wo die Stege in die Deckschichten übergehen. Von dort erfolgen Einrisse und das Gesamtsystem delaminiert sich. Anhand der Versuche konnte das Tragwerk so vorbemessen werden, das bei einer maximalen Schubbeanspruchung, welche sich aus einer Belastung von 1,7 kN/m² unter dem festgelegten Tragwerksaufbau ergeben würde, die Querwände noch nicht ausbeulen.

Abb. A 20
Geometrie**Berechnungsverfahren:**

In *Genzel/Voigt (2005)* wird anstelle der Berechnung exemplarisch der Durchstanznachweis nach *Hintersdorf (1972)* geführt. Demnach beträgt die reduzierte Querkraft im Stanzkegel $Q_{\text{red}} \approx 100 \text{ kN}$. Mit dem Radius des Stanzkegels von 1,4 m wird eine Kreis geschlagen, der an 16 Stellen eine Kassettenwand schneidet. In jedem dieser Schnitte wirkt eine Schubspannung von $\tau_{\text{sk}} = 0,21 \text{ kN/cm}^2$, welche kleiner als die zulässige Schubspannung zu $\tau = 1,4 \text{ kN/cm}^2$ ist. Diese Beanspruchung wird maßgebend für den Nachweis der Stabilität. Am Stützenkopf sind die verstärkten Kassettenstege 6 mm. In *Genzel/Voigt (2005)* wurde ermittelt, dass die Stegdicke für den Nachweis der Stabilität mindestens 4,25 cm betragen muss.

Belastungen:

Aus dem von Heinz Isler bestätigten Konstruktionsaufbau und den Schweizer Normlasten ergeben sich folgende Hauptlasten:

Eigenlast:

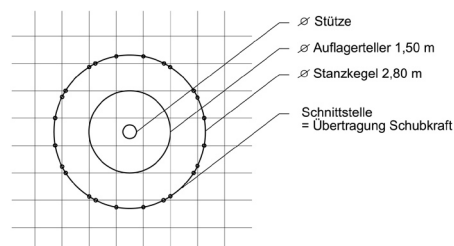
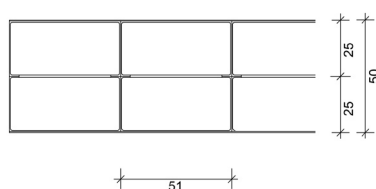
$$\begin{aligned} [(2 \times 0,004 + 0,002) \times 2 \times 18] &= 0,216 \text{ kN/m}^2 \\ + 0,0015 \times 4 \times 4 \times 18 &= 0,203 \text{ kN/m}^2 \\ g &= 0,419 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Schneelast:

$$\begin{aligned} s &= 1,30 \text{ kN/m}^2 \\ q &= 1,72 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Abb. A 21, A 22

Aufbau des Hohlkammer-Sandwiches, Stanzradius



Spannungen:

Biegespannungen in Plattenquerrichtung:

$$s_D = 3 \text{ mm}$$

$$s_m = 49,7 \text{ mm und}$$

$$M_{\text{Bem,SS}} = 30 \text{ kNm/m ist}$$

$$\sigma_D = 30 \text{ kNm/m} \times \frac{1}{0,3 \text{ cm} \times 49,7 \text{ cm}} \quad (\text{is 4})$$

$$\text{vorh } \sigma_D = 2,0 \text{ kN/cm}^2 = \text{zul } \sigma = 2,0 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{zul } \sigma_{z,B} = \sigma_{z,\text{Kurzzeit}} / \nu = 10,0/5 = 2,0 \text{ kN/cm}^2$$



Herstellung und Errichtung:

Die Herstellung der Stützkernplatte hat sich Isler patentieren lassen. Er wendet die Technik nicht nur bei der Tankstelle Thun, sondern auch beim Oberlicht der Kirche Maria Regina in Fellbach (D) an sowie beim Pausenhof der Realschule in Geislingen (D) und den Lichtdächern des Rheinkraftwerk in Säckingen (CH) an.

Für die in einem Stück hergestellte Platte der Tankstelle Thun wird ein temporäres Zelt errichtet. Nach Anhärtung der unteren Deckschicht werden die Stützkern-Kuben in die noch feuchte Masse eingesetzt. Die zweite Lage Kuben wird mit der ersten verklebt. Anschließend wird die obere Deckschicht laminiert und nach Verspachtelung der Fugen ist die Platte mit einer Hilfsvorrichtung transportabel und kann mittels Kran auf die vorbereiteten Stützenköpfe aufgesetzt und arretiert werden



Abb. A 23 (oben rechts) Tankstelle Thun Polónyi (1970)

Abb. A 24 (mitte) die Platte wird auf einem Stützenkopf aus Stahl gelagert Polónyi (1970)

Abb. A 25 Um die Herstellung vor Ort zu ermöglichen, wurde ein temporäres Zelt errichtet Isler (1975)



Pavillonüberdachung „Les échanges“

Lage: Gelände der Schweizer Landesausstellung in Lausanne, Eingangsbereich des Sektors „Waren und Werte“

Jahr: 1962/ Aufbau 1963/ Eröffnung 1964

Standdauer: 3 Jahre

Gebäudetyp: Überdachung einer freien Fläche, Platzüberdachung

Ausführung: einmalige Ausführung für eine Messe

Bauherr: Exposition Nationale Schweiz (Chefarchitekt: Alberto Camenzid)

Architekt: F. Vischer und G. Weber (Federführung Expo); M.-H. Burkhardt, R. Gutmann, W. Wurster (Basel) für den Bereich „Waren und Werte“

Ingenieur: Heinz Hossdorf, Basel

ausführende Firma: CIBA

Tragwerkstyp: Schirmkonstruktion aus Hyparschalen, auf Metallrahmen verklebt, 24 Schirme, insgesamt 108 × 72 m Überdachung;

Abmessung der Schirme $B \times L \times H = 18 \times 18 \times 6,70$ m, Schirm aus drei verschiedenen Hyparschalentypen zusammengesetzt, Schalendicke $t = 3$ mm

Blechrohrstütze $H = 4,87$ m

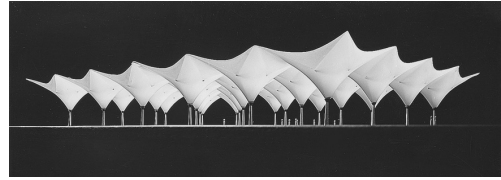


Abb. A 26 und A 27

Modell und Realisierung des Pavillons „Les Echanges“ auf der Expo '64 in Lausanne Hossdorf (2003)

Bibliographie:

Barth, Karl: Skizze eines Rundgangs durch die Ausstellung. In: *Neue Zürcher Zeitung* : (1964-04-23)

Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (17.05.2004, 10:00-10:20 MEZ): Gespräch mit Heinz Hossdorf

Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (14.06.2005, 10:00-10:20 MEZ): Gespräch mit Heinz Hossdorf in Madrid

Hossdorf, Heinz: *Plastic Shell Structure for the Swiss National Exhibition in 1964*. World conference on Shell Structure, San Francisco : Oktober 1962

Hossdorf, Heinz: *Projekt, statische und experimentelle Untersuchung für die Kunststoffkonstruktion des Hauptpavillons*. statische Berechnung des Ingenieurbüros H.

Hossdorf Ingenieur SIA, Tellplatz 12, Basel, erstellt zu Händen der technischen Expertenkommission der Expo 64 in Lausanne, 1963

Hossdorf, Heinz: Design construction and experience with post-tensioned polyester roof in the Swiss National Exhibition. In: *Plastics in Building Structures*, Proceeding of a conference held in London, 1. Edition, London : Pergamon Press, 1966

Hossdorf, Heinz: *Das Erlebnis Ingenieur zu sein*. Basel : Birkhäuser Verlag, 2003

Krasny, Elke; Rapp, Christian: Die Flucht nach vorne. In: *Architektur aktuell* Heft 201 (1997), S. 82-91

Zerning, John: *Design Guide to Anticlastic structures in Plastic*. London : Polytechnic of Central London, 1975 und 1976

Zustandekommen des Projektes:

In unregelmäßigen Abständen wurde seit 1883 in der Schweiz eine Landesausstellung (Expo) abgehalten. Die Expo '64 in Lausanne gliederte sich in mehrere Sektoren, darunter den Sektor „Waren und Werte“, der die thematische Auseinandersetzung mit dem Thema der gleichnamigen Überdachung „les échanges“, also mit dem Handel und der Außenwirtschaft sein sollte. Von den Verantwortlichen der Expo, insbesondere dem Chefarchitekten Alberto Camenzid und Franz Arnheim, dem Leiter der Bauabteilung der Expo konnte das Planungsteam ausgewählt werden. Darunter befand sich neben den o.g. Architekten auch der Ingenieur Heinz Hossdorf, der seit 1953 in Basel ein Ingenieurbüro betrieb sowie ein Laboratorium daran angeschlossen hatte. Er war als entwerfender Ingenieur für besondere Aufgaben bereits bekannt und gehörte zum Freundeskreis der beauftragten Architekten, die ihn für die Überdachung des Eingangsbereiches vorschlugen und ihm freie Entwurfsverfügung gaben Genzel/Hossdorf (17.05.2004). Hossdorf erinnert sich an die erste Idee für das ausgeführte Tragwerk genau. Er war zu diesem Zeitpunkt oft in Holland und hatte bei der Betrachtung der dortigen Tulpenfelder und eines „durchspazierenden“ Maulwurfs die Vorstellung, das eben Gesehene in eine Tragkonzept umzusetzen Genzel/Hossdorf (14.06.2005). Mit glasfaserverstärktem Kunststoff gelang ihm die Umsetzung einer solchen Idee eines solchen Tulpenfeldes, welches tagsüber das Sonnenlicht durchläßt und nachts selbst leuchtet. Das durchscheinende und tragfähige Material kannte er als Modellbaumaterial. Nur durch diese Kenntnis der materialtechnischen Besonderheiten war es ihm möglich, ein solches Projekt anzudenken und zu realisieren Genzel/Hossdorf 14.06.2005).

Tragwerk:

Die Idee des Tulpenfeldes übersetzte Hossdorf konstruktiv in die Ausbildung von „Einzelblüten“, deren Form durch Hyparschalen gebildet wird. Durch Aneinanderreihung der Einzelblüten entsteht das Tulpenfeld. Sollte das Projekt finanzierbar bleiben, so kamen nur sehr dünne Membrane aus glasfaserverstärkten Kunststoffen in Betracht. Darin genau bestand das Problem. Hossdorf beschreibt die Entstehungsgeschichte der Tragkonstruktion des Pavillons als das „größte Abenteuer seines Lebens“. Die Zeit von der ersten Idee, die er formenketend versuchte abzubilden, bis zum ersten bestandenen 1:1 Modellversuch verging ein „Leidensgeschichte“ Genzel/Hossdorf (17.05.2004).

Den entscheidenden Fortschritt während der Entwurfsphase brachte die Überlegung, die einzelnen Hyparschalen vorzuspannen. Die vorgespannten dünnen Schalen mussten zur Stabilisierung allerdings mit einem Stahlrahmen verbunden werden, der die Krafteinleitung ermöglichte. Es entstand ein Stahl-Kunststoff-Verbundquerschnitt.

Die Hyparschalen – der konstruktive Aufbau (Abb. 31)

„Die Fläche jedes Einzelpilzes ist zusammengesetzt aus total 8 Einzelementen, nämlich 4 zentralen hyperbolischen Paraboloiden Typ A, deren Spitzen am Auflagerpunkt O₁ zusammenlaufen und sich längs ihrer Ränder bis zum Punkt O₂ berühren. Von dort kragen sie frei bis zu den Ecken O₃ aus. Weiterhin besteht der Pilz aus vier Hälften von hyperbolischen Paraboloiden Typ B zwischen den Punkten O₃, O₂, O₃, die von den entsprechenden Elementen des benachbarten Pilzes (gestrichelte Linie) zu Ganzen ergänzt werden. Ein Zugband T verbindet die Ecken, um deren exakten Abstand festzuhalten. Über den Punkten O₂ ist eine Rohrkonstruktion errichtet, die dazu dient, eine gleichmäßige Vorspannkraft in die Elemente Typ A einzuführen. Die Vorspannung wird durch eine speziell eingebaute Presse zwischen O₁ und O₂ erzeugt. In Figur 3 und Fig 4 ist das Kräftespiel und die Verformung infolge der Spannkraft V dargestellt. [...] Die Elemente von Typ A werden in allen Richtungen unter Zugspannungen gesetzt. Die Druckkräfte werden praktisch nur durch die Stahlkonstruktion ... übernommen. Der mit dem Stahl fest verbundene Polyester steift jedoch die dünnen Stahlprofile gegen Ausknicken genügend aus. Die Elemente vom Typ A stellen also die wirklichen Träger der ganzen Konstruktion dar, die später mit den benachbarten Elementen verbunden, als Dreigelenkbogen wirken kann. Die Elemente Typ B haben nur sekundäre Tragfunktion, erhöhen aber zweifellos die Steifigkeit des Gesamtbauwerkes.

Die Pilzfüße sind auf 4,50 m hohen Blechrohrstützen aufgelagert, die ihrerseits fest in die Fundamente eingespannt sind.“

Hossdorf (1963), 5

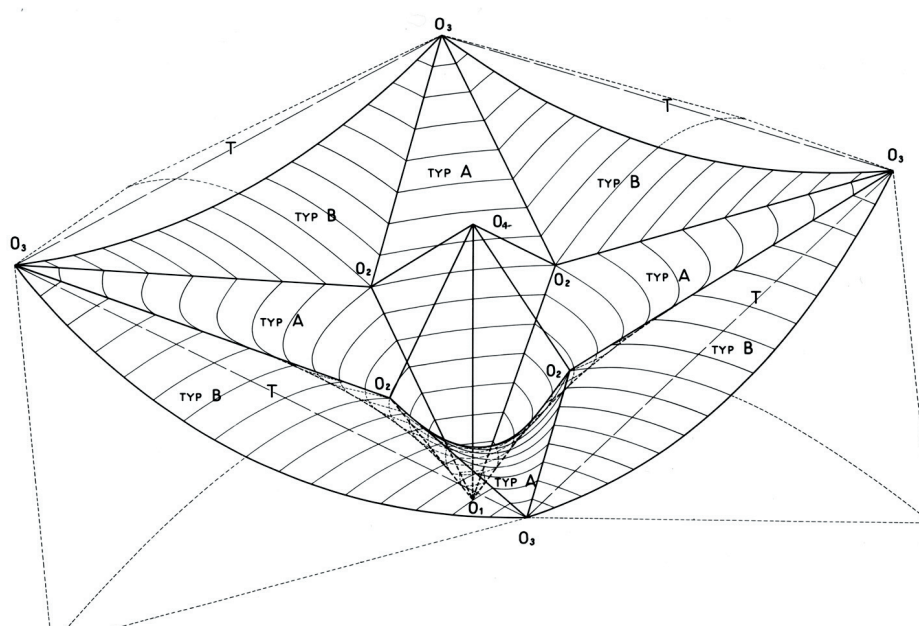


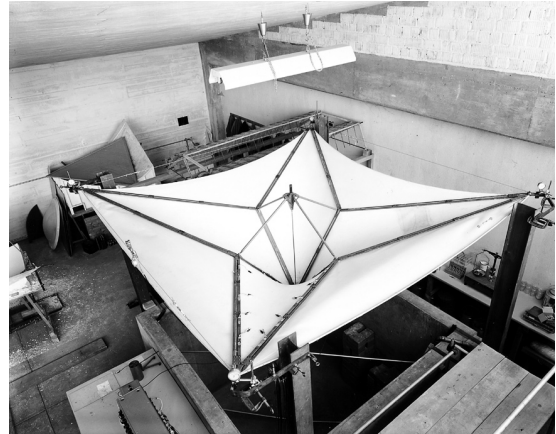
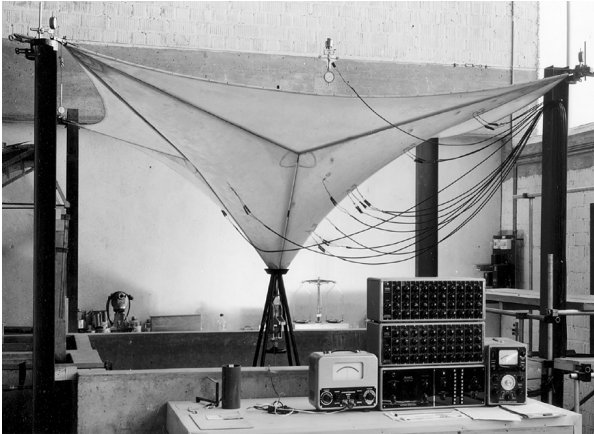
Abb. A 31 geometrischer Aufbau der Hyparschale Hossdorf (1963)

Das Aufspannprinzip:

Das Prinzip der Vorspannung kannte Hossdorf bereits aus einer anderen Anwendung. Während eines Praktikums innerhalb seines Studiums auf einer Schiffswerft bei Antwerpen war er davon fasziniert. Das Vorspannprinzip kann man sich vorstellen wie das Aufspannen eines Schirmes. Durch Auffahren eines Gestänges werden die Haupttragelemente unter Vorspannung gesetzt. Die GFK-Schicht wird also planmäßig unter Zug gesetzt, die auftretenden Druckspannungen im System werden allein von den stählernen Randverstärkungen aufgenommen. Die Vorspannung muß so groß sein, das unter Eigenlast und Erwärmung keine Druckbeanspruchung entsteht. Für das Auffahren wählte man hydraulische Pressen, die nach der Vorspannung hätten entfernt werden könnten. Sie verblieben aber an Ort und Stelle und ermöglichten ein Nachspannen für nicht bekannte Spannkraftverluste aus Kriechen. Das Nachspannen war jedoch nicht nötig. Die aufgebrachte Vorspannung auf die Schirme betrug 180 kN.

Das Verbundproblem zwischen GFK und Stahl

Hossdorf erkannte, das das Verbinden der GFK-Hyparschalen mit dem stählernen Rand nur über eine kontinuierliche Verbindung gelöst werden konnte. Das Projekt Expo'64 wird somit zu einem der ganz wenigen Beispiele für materialgerechte Verbindungen. Allerdings konnte er sich über die Art der Verbindung erst nach einer Reihe von Versuchen sicher sein.



statische Berechnung:

Die von *Hossdorf (1963)* erstellte statische Berechnung diente in erster Linie dazu, der Bauherrenschaft eine überzeugende schriftliche Darstellung des Tragverhaltens anzubieten und den Beweis zu erbringen, dass das geplante Bauwerk standsicher sein würde *Genzel/Hossdorf (17.05.2004)*. Hossdorf selbst war von der Standsicherheit seines gewählten Tragwerkes nur über Versuche zu überzeugen. Er erprobte erst das einzelne Kernelement, später konnten diese Erkenntnisse am Prototyp bestätigt werden.

Berechnungsverfahren:

Hossdorf ermittelt nach den Regeln der Elastizitätstheorie die Schnittgrößen in der Schale. Die zugehörigen Spannungen stellt er den zulässigen gegenüber. Die zulässigen Spannungen gewinnt er anhand von Zugversuchen und Zeitstandsversuchen unter Last und Wärme 70°C. Sie laufen über 120 h und ergeben eine logarithmische Kurve (Abb. 135). Die von Hossdorf selbst als rudimentär bezeichneten Kriechversuche schließen ab mit der Feststellung, dass das Kriechmaß während der Aufstelldauer der Expo (3 Jahre) nicht mehr als das doppelte (2,0) betragen wird. Die gesamte Abminderung der gemessenen Kurzzeitfestigkeit legt Hossdorf mit 6,0 fest und erfasst darin Kriechen unter Last, unter Wärme, Herstellungsungenauigkeiten, Medieneinflüsse wie UV-Licht sowie den allgemeinen Sicherheitsfaktor.

Belastungen:

Ansatz nach SIA ohne Anpassung oder Abminderung

Der Grundlastfall ist der Lastfall Vorspannung. Er entsteht aus der Vorspannkraft von $V = 180 \text{ kN}$. Alle Lastfälle werden mit der Vorspannung überlagert.

Untersucht wird der Hauptlastfall Eigenlast und Schnee, der die maximale Druckspannung im Polyester erzeugt:

Eigenlast aus 3 mm GUP, nach *Hossdorf (2003)* $15 \text{ kg/m}^2 =$

$$= 0,15 \text{ kN/m}^2$$

Schneelast

$$= 0,60 \text{ kN/m}^2$$

Die Lastfälle

Abkühlung

$$= -30 \text{ °C}$$

Erwärmung

$$= +30 \text{ °C}$$

werden mit dem dem Hauptlastfall superponiert, wodurch im Lastfall Erwärmung die Spannung soweit erhöht, dass der Zugband spannungsfrei wird.

Die Lastfälle Wind:

Staudruck $q = 85 \text{ kg/m}^2 = 0,85 \text{ kN/m}^2$, Formbeiwerte

Es werden zwei Laststellungen untersucht:

A) Windrichtung senkrecht zum Pilzrand

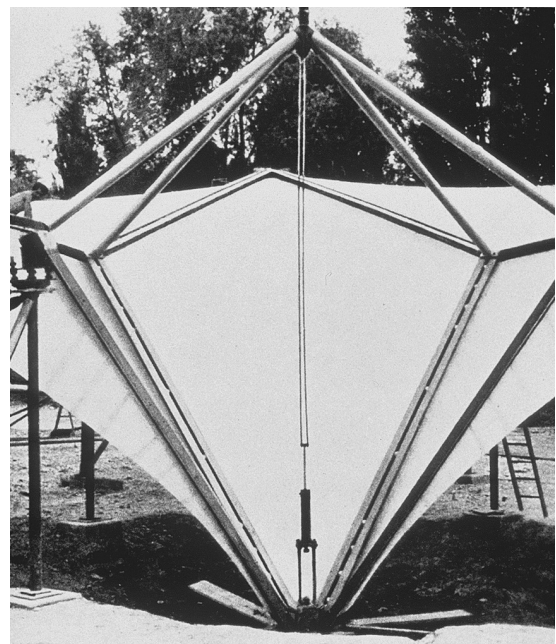


Abb. A 28 (oben links) und A 29 (oben rechts)
allein durch eine Reihe von Testserien konnte sich Hossdorf
über das Tragverhalten der Hyparschalen Klarheit verschaffen
Hossdorf (2003)

Abb. A 30 die Hyparschale wird über einen Schirmmechanismus
vorgespannt *Hossdorf (2003)*

B) Windrichtung diagonal

Als Flächen, auf die der Windsog wirkt, wird die ganze Grundrissfläche der tragenden Blütenblätter und die halbe der nichttragenden angesetzt. Dieser Ansatz erscheint Hossdorf so ungünstig, dass er ihn später halbiert.

Aus dem Windsog auf das Dach wird die Zugkraft im Polyester erhöht oder reduziert, je nach Windeinfallsrichtung.

Maximal reduziert sich die Vorspannkraft um 2,1 to (21kN), maximal erhöht sie sich um 29,7 to (297 kN). (diese Werte werden nur zur Hälfte angesetzt.

Spannungen:

Beanspruchung im Polyester:

Die maximale Zugkraft im Polyester ergibt sich aus Vorspannung und Wind

$$Z = 120 \text{ kN} + 297/2 \text{ kN} = 269 \text{ kN}.$$

Die Fläche auf der diese Zugkraft wirkt, setzt sich aus der Multiplikation von Polyesterdicke und Pilzbreite zusammen

$$A_{\text{Zug}} = 0.30 \times 480 = 144 \text{ cm}^2$$

Die maximale Zugspannung beträgt

$$\sigma_{\text{längs,max (VSP+w)}} = 269/144 = 1,87 \text{ kN/cm}^2$$

Die zulässige Zugspannung beträgt

$$\text{zul } \sigma_{\text{längs,max}} = \sigma_{\text{Kurzzeit}}/6,0 = 9,3/6 = 1,55 \text{ kN/cm}^2$$

Die minimale Zugspannung ist etwa null, eine Druckspannung tritt nicht auf.

Herstellung:

Die Hyparschalenelemente wurden im Handlaminierverfahren hergestellt. Sie wurden in einer Fabrik ca. 200 km vom Aufstellort vorgefertigt. Die Schalung selbst war eine Polyesterform mit Stahlrahmenverstärkung. Die verwendeten Einlagen waren Glasfasermatten von 300 g/m², die in gleicher axialer Ausrichtung in die Form gelegt wurden, wodurch sich das typische „gestreifte“ Bild ergibt. Nach Trocknung und Entschalung erfolgte die Verbindung der Schalen mit dem Stahlrahmen. Die Elemente werden unter Druck auf die sandgestrahlten Flacheisen geleimt *Hossdorf (2003), 23*. Sowohl das Glasfaser-Polyester als auch der Aralditklebers wurde von der Firma CIBA geliefert.

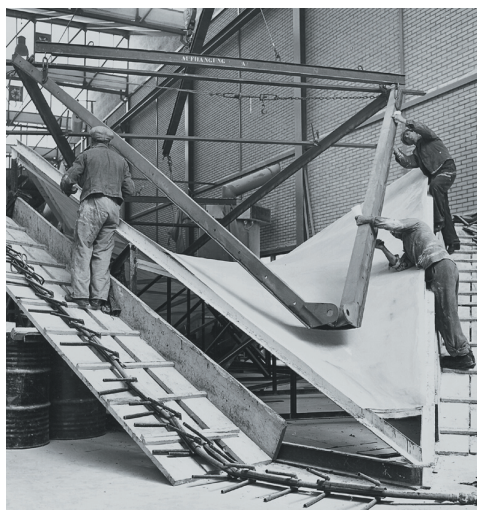


Abb. A 32 (links) und A 33
Die Hyparschalenelemente wurden im Handlaminierverfahren hergestellt. Nach Trocknung und Entschalung wurden die Elemente mit dem Stahlrahmen verklebt. *Hossdorf (2003)*

Errichtung:

Die Hyparschalenelemente einer Blüte, die bereits mit dem Stahlrand verklebt waren, wurden über einem Lehrgerüst zusammengebaut und miteinander verschraubt. Das Zugband diente der exakten Arretierung. Die zusammengesetzte Tulpenblüte wurde mit zwei Pneumatischen Kränen auf die vorbereiteten Stahlstützen gehoben und mit dieser über einen einzigen Bolzen verbunden. Die Gesamtstabilität des Bauwerks ergab sich über die Verbindung aller Schirme miteinander und über die Abspannungen der vier Enden.

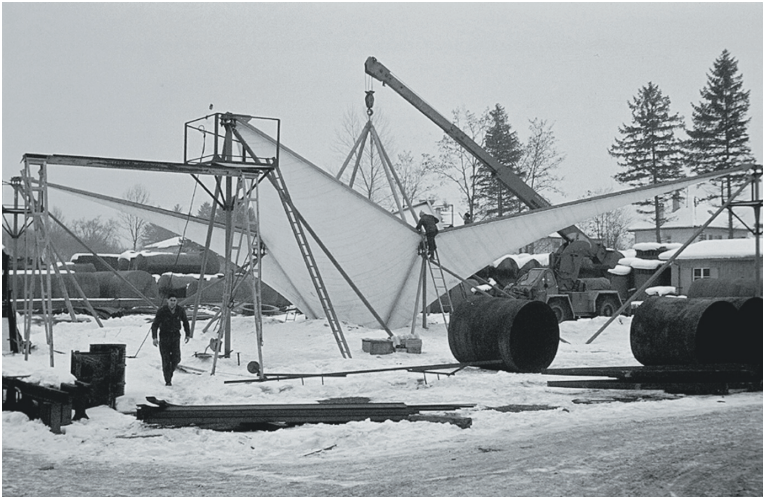


Abb. A 34a

Die vorgefertigten Schalenelemente wurden vor Ort über einem Lehrgerüst zusammengebaut *Hossdorf (2003)*

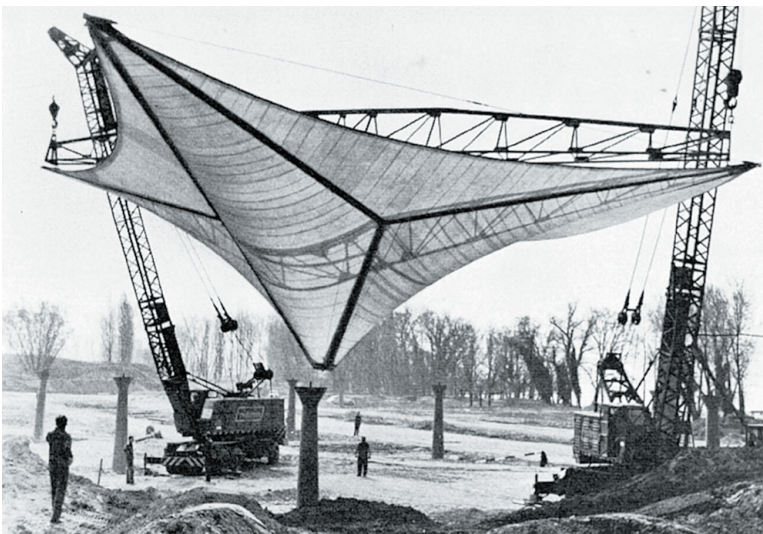


Abb. A 34b

Nach dem Zusammenfügen der Schalenelemente über Bolzenverbindungen am Stahlrahmen wurden die fertigen „Blüten“ per Kran auf die vormontierten Stützen gehoben *Hossdorf (2003)*

Bulle Six Coque

Lage: diverse Standorte, größte Anzahl (20) im Feriendorf Gripp in den franz. Pyrenäen

Jahr: Idee 1964-66, Fertigstellung 1969-70

Standdauer: 1998 Abbau des Feriendorfes, z.T. an Galerien verkauft, weitere in Halle zwischengelagert

Gebäudetyp: mobiles Ferienhaus mit 36 m² WFL

Ausführung: insgesamt ca. 100 Stück

Bauherr: Jean Maneval

Architekt: Jean Maneval, Ifert + Meyer

Ingenieur: Yves Magnant

ausführende Firma: Alco; Batiplastique, Dubignon (Normandie, F)

Tragwerkstyp: sechs schalenförmige Raumteile sternförmig angeordnet, Auskragung 2,30 m, Höhe Auskragung 2,95 m, Stützkernkonstruktion d = 45 mm; Deckschichten 2,5 mm GFK, Kern 40 mm PUR-Hartschaum



Abb. A 35 Ansammlung von Bulle Six Coques in einem Feriendorf in Gripp (Haute-Pyrénées, F) Schwabe (9/1969)

Bibliographie:

Bancilhon, Philippe, Atelier d'Architecture et d'urbanisme, Frankreich, Paris, Tel 01.53.27.66.12, Fax 01.53.27.66.10: Brief vom 24.05.2004 an Elke Genzel, FOMEKK, Bauhaus-Universität Weimar

Bancilhon, Philippe: *La Bulle six coques*. Paris: Eigenverlag jousse entreprise, 2003

Doernach, Rudolf: *Bausysteme mit Kunststoffen*. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1974

Dubigeon-Normandie. In: techniques et Architecture Heft 4 (1971), S. 97

Ganz-Plastik-Haus auf der Ausstellung Arts Ménagers 1956 in Paris. In: *Bauen + Wohnen* Heft 2 (1957), S. 57-59

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar: Universitätsverlag, 2005

Guillot, Nicole: Jean Maneval. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Heft 148 (1970), S. 56-59

Jousse-Entreprise Galerie: Archivmaterial, Paris, 2004

Knitz, Andreas: Archivmaterial, Berg b. Ravensburg, 2004

Quarmby, Arthur: *The Plastics Architect*. London: Pall Mall Press, 1974

Schwabe, Amtor: Möglichkeiten und Grenzen von Baukonstruktionen mit Kunststoffen. In: *Detail* Heft 1 (1971), S. 5

Topham, Sean: *Where is my Space Age?* München: Prestel, 2003

une reconversion réussie. In: *Plastiques Batiment* Heft 10 (1967), S. 20

<http://www.designboom.com/eng/archi/maneval.html>

<http://www.jousse-entreprise.com/html/furniture/maneval/maneval01.html>

<http://www.olats.org/schoffer/giap1.htm>

Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (20.06.2004, 14:00-14:10 MEZ): Gespräch mit Philippe Jousse, Jousse-Entreprise Galerie

Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (13.10.2004, 13:00-13:10 MEZ): Gespräch mit Matthias Stief, Berlin

Zustandekommen des Projektes:

Das Bulle Six Coque wurde von Jean Maneval zwischen 1964 und 1966 entwickelt. Neben der reinen formalen und bautechnischen Entwicklung betrieb Maneval auch Marktstudien, Studien zur Realisierung und suchte finanzielle und technische Unterstützung, die er in der Firma Bâti-Plastique fand. 1966 realisierte Maneval eine kleinere Version, das Bulle Trois Coque aus lediglich 3 Schalen. 1967 erfolgte der Aufbau einer experimentellen Feriensiedlung von 20 Häusern des Bulle Six Coque (aus 6 Schalen) in Gripp in den Haute-Pyrénées. 1967 meldete Jean Maneval die Konstruktion zum Patent an und warb für den Verkauf, um die weitere Produktion des Kunststoffhauses zu sichern. Von 1969 bis 1970 stellte die Firma Plastique, F-76 Grand-Quevilly weitere 30 Bulle Six Coque her Guillot (1970). Es wurden insgesamt 100 Kunststoffhäuser produziert Bancilhon (2003).

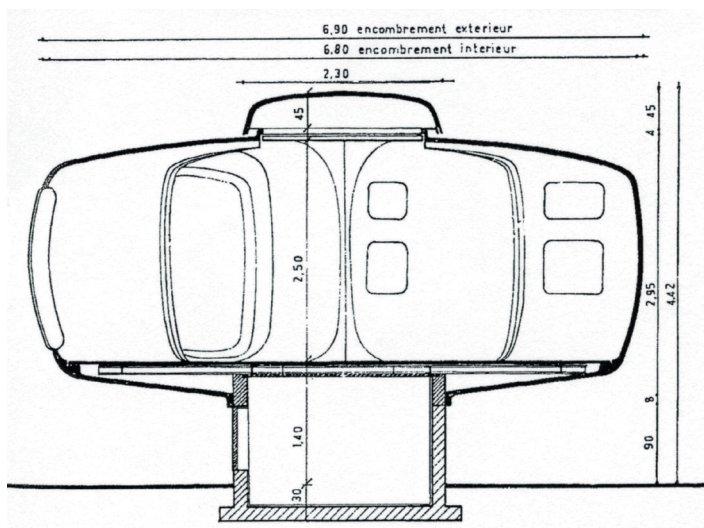


Abb. A 36 Schnitt durch das Bulle Six Coque Guillot (1970)

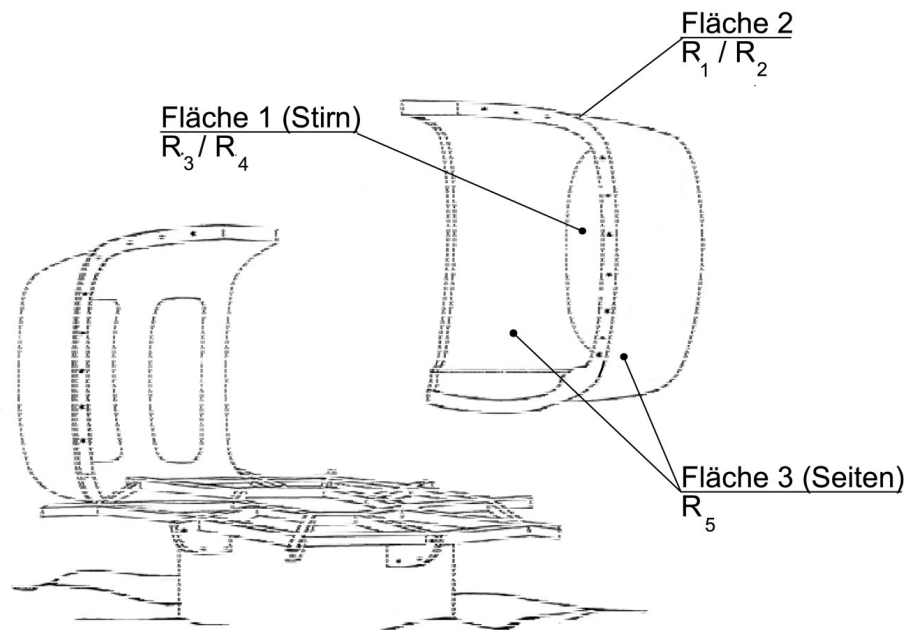


Abb. A 37 Schema der Krümmungsradien der Schalen

Tragwerk:

Vorwiegend biegebeanspruchte Schalenteile, deren Krümmungen z.T. zu flach sind, um als Schale über Membrankäfte zu tragen

Jede der sechs sternförmig angeordneten Schalenteile setzt sich zusammen aus:

1. dem Dach, bezeichnet als Beulfeld 2, doppelt gekrümmt, mit den Krümmungsradien von $R_1 = R_2 = 7,0 \text{ m}$, Länge \times Breite = $2,50 \times 2,0 \text{ m}$
2. der vertikalen Stirnwand, bezeichnet als Beulfeld 1, doppelt gekrümmt mit den Krümmungsradien $R_3 = 2,50 \text{ m}$ und $R_4 = 3,0 \text{ m}$, Höhe \times Breite = $2,50 \times 2,0 \text{ m}$
3. den vertikalen Seitenwänden, bezeichnet als Beulfelder 3, einfach gekrümmt mit Krümmungsradius $R = 7,0 \text{ m}$, Höhe \times Breite = $2,50 \times 2,0 \text{ m}$
4. dem Boden, bezeichnet als Beulfeld 4, Länge \times Breite = $2,50 \times 2,0 \text{ m}$

Die Beanspruchung der einzelnen Schalenteile wird wie folgt hergeleitet:

1. Das Dach hat eine ausreichende Krümmung, um die vertikalen Lasten über Normalkräfte abzutragen.
2. Die vertikale Stirnwand erhält Druckkräfte aus der Lastweiterleitung des Dachelementes sowie Normalkräfte aus der Membrantragwirkung bei Windbelastung.
3. Die vertikalen Seitenwände erhalten ebenso Druckkräfte aus der Lastweiterleitung des Dachelementes sowie Biegung aus dem Lastfall Wind, da die einfache Krümmung zu gering ist für eine alleinige Membrantragwirkung. Die Wände sind am unteren Ende mit Stahlschwertern verbunden. Diese lagern wiederum auf dem Stahlkranz. Zur Lastübertragung an den Schwertern erhalten die Schalenteile Randpfalze. Die Schalenteile werden mit den Schwertern passgenau und wasserdicht verbunden. Ein T-Profil aus Neopren sorgt für die Wasserdichtigkeit der Verbindung.
4. Der Boden ist nur durch Eigengewicht belastet.
5. Der Stahlkranz trägt nicht nur die Last aus den Schalenteilen, sondern auch den Fußboden des Hauses und die anzusetzende Verkehrslast. Er ist mit einer Platte aus Sperrholz bedeckt.
6. Ein Sockel trägt den Stahlkranz. Er kann sowohl aus Beton als auch aus ausgekreuzten Stahlstützen bestehen.

statische Berechnung:

Das Bulle Six Coque wurde nicht bemessen. Phillip Bancilhon vertritt die Ansicht, das die französischen Pioniere des Kunststoffbaus ihre Forschungsarbeiten immer an Prototypen in Originalgröße durchgeführt haben, die die realen Bedingungen tatsächlich abbildeten. Dies wurde auch beim Bulle Six Coque so gehandhabt *Bancilhon (24.05.2004)*.

folgende Seite

Abb. A 38 (links oben) Grundriss *Drei Kaufangebote (1969)*

Abb. A 39 (links unten) Innenansicht eines Hauses in der Siedlung Gripp *Drei Kaufangebote (1969)*

Abb. A 40 (oben rechts) Innenansicht, deutlich sichtbar sind Ausbeulungen aus Überbeanspruchung des Materiales *FOMEKK (2004)*

Abb. A 41 bis A 43 (rechts mitte bis unten) Aufbau des Hauses *Knitz (2004)*

Material:

Die Sandwich-Schalen bestanden aus handelsüblichem Polyesterharz mit Glasfasern und PUR-Hartschaum als Dämmung. Schichtenaufbau *Schwabe (1971)*:

2,5 mm GUP – 40 mm PUR-Hartschaum – 2,5 mm GUP.

Nach Philippe Bancillon handelte es sich allerdings um eine 100 mm starke Dämmschicht *Bancillon (2003)*.

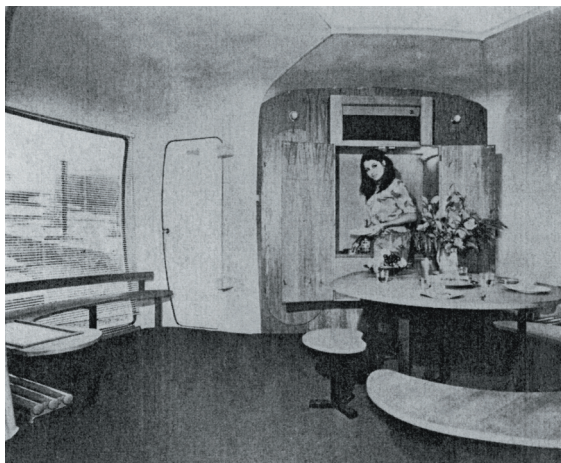
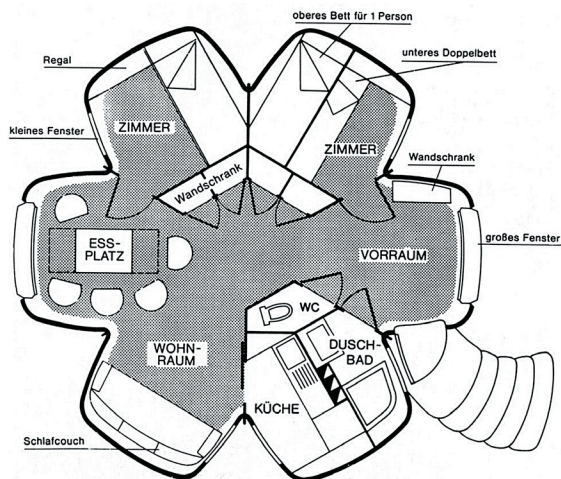
Über die mechanischen Kennwerte des GFK ist nichts bekannt.

Herstellung:

Alle 6 Schalen wurden mit einer Form hergestellt, die aus Polyesterharz mit außenliegendem Stahlgestell (zusätzliche Formstabilität) bestand. Die auf die Herstellung von Bootsschalen spezialisierte Firma Jouet konstruierte die erste Schale und erarbeitete den Herstellungsprozess, bevor das Unternehmen Dubigeon-Normandie die Serienproduktion übernahm *Bancillon (2003)*.

Errichtung:

Der Aufbau eines Bulle Six Coque wurde von einem Besitzer dokumentiert *Knitz (2004)*. Für den Aufbau ist keine zusätzliche Hebevorrichtung erforderlich. Der Deckel des Gebäudes wurde als Zugring ausgebildet.



Futuro

Lage: verschiedene Standorte (Finnland, Deutschland, Russland, Australien)

Jahr: 1968 bis 1978

Standdauer: bis heute (2005)

Gebäudetyp: mobiles Ferienhaus mit 50 m² WFL

Ausführung: mehrmalige Ausführung (weltweit 35 Stück)

Bauherr: Jaakko Hiidenkari (Fin), später Polykem Ltd. (Fin)

Architekt: Matti Suuronen (Fin)

Ingenieur: Yrjö Ronkka und Matti Sihvonen für Polykem (Fin)

ausführende Firma: Polykem Ltd. (Fin)

Tragwerkstyp: Ellipsoidenschale auf Stahlring aufgelagert,

D = 7,80 m, H = 3,80 m

Stützkernkonstruktion für die Planung: d = 45 mm; Deckschichten 2,5 mm

GFK (30 %), Kern 40 mm Pur-Schaum

für die Ausführung: d = 58 mm; Deckschichten 3 und 5 mm GFK (30 %), Kern 50 mm Pur-Schaum

Bibliographie:

Born, J.: *Praktische Schalenstatik*. Berlin : Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, 1960

Dietz, A.G.H.; Heger, F.J.; Chamber, R.E.: *On the Use of Plastics and other Composite Materials for Shell Roof Structures*. San Francisco : World Conference on Shell Structures, 1962

Die Wochenschau: Wer hat Angst vor Gelb, Braun, Grün?!. In: *Bauwelt* Heft 9 (1998), S. 392

Doernach, Rudolf: *ika '72 - 2. Internationale Kunststoff-Haus-Ausstellung der Welt*. Lüdenscheid : 1972, S. 31. - Ausstellungskatalog

FOMEKK: Futuro Nr. 013, Berlin, 2004, Archivmaterial

FOMEKK: Exkursion Helsinki, 2004, Archivmaterial

Forum: Tankstelle aus GFK-Schalen und GFK-Raumeinheiten. In: *Bauen + Wohnen* Heft 11 (1972), S. 484

Futuro – Maison de vacances en matériaux plastique. In: *l'architecture d'aujourd'hui* Heft 3 (1970), S. 95

Genzel, Elke; Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (02.06.2004, 11:30-15:00 MEZ): Gespräch mit Matti Suuronen und Ossi Siponen, (Ingenieurbüro Ossi Siponen, Malminkaari 5, 00700 Helsinki)

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar: Universitätsverlag, 2005

Girkmann, Karl: *Flächentragwerke*. 5. Aufl. Wien : Springer Verlag, 1959

Götze, Heinz: Kunststoffhäuser: Futuro-Freizeithaus. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 14 (1969), S. 30

Heimann, Jim: *All American Ads of the 50's*. Köln : Taschen-Verlag, 2001

Home, Marko; Taanila, Mika: *Futuro – Tomorrow's House from Yesterday* Helsinki : Desura Oy Ltd., 2002

Kasiske, Michael: Von Helsinki zum Plänterwald. In: *Bauwelt* Heft 46 (2003), S. 28-31

<http://www.angelfire.com/home/futurohouse/index.html>

IBK Bibliothek: Sammlung SL 7.70. Ludwigshafen, 2004, Archivmaterial

Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V. (Hrsg.): *Kunststoffhäuser und Raumzellen*. Darmstadt : IBK-Verlag, 1973

Kulturpark Berlin, 1. Bauabschnitt – Vergnügungspark. in *Deutsche Architektur* Heft 9 (1970), S. 525-529

Ludwig, Matthias: *Mobile Architektur*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1998

Quarby, Arthur: *The Plastics Architect*. London : Pall Mall Press, 1974

Remmele, Mathias: *'68 – Design und Alltagskultur zwischen Konsum und Konflikt*. Kunstmuseum Düsseldorf, Köln : DuMont, 1998

Saechting, Hansjürgen: *Bauen mit Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 1973

Schwabe, Amtor: Kunststoffhäuser zu verkaufen. In: *Kunststoffe - Plastics* Heft 9 (1969), S. 343

Suuronen, Matti: Ansio – Ja Työluettelo. Espoo, 1983. - Firmenschrift

Suuronen, Matti: Espoo, 2004, Archivmaterial

Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.: *Theory of Plates and Shells*. 1. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1959

Timoshenko, S., Gere, J.: *Theory of Elastic Stability*. 2. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1961

Überblick: Zum Mond. in *Bauwelt* Heft 8 (1969), S. 1034

Venturo – Kunststoffhaus. In: *Bauen + Wohnen* Heft 4 (1973), S. 142

Wende, A.; Bernert, J., Hintersdorf, G.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke aus schalenförmigen und gekrümmten GFK-Fertigteilen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 899-902



Abb. A 44 Futuro Fomekk (2004)

Zustandekommen des Projektes:

1964 wurde der finnische Architekt Matti Suuronen von einem ehemaligen Schulkameraden, Jaakko Hiidenkari, um den Entwurf einer Skihütte gebeten, welche schnell zu heizen und leicht in rauem Gebiet aufzustellen sei. Der Projektname war daher After-Ski Cabin. Suuronen, der bereits Erfahrungen mit GFK während eines Workshops sammelte, entwickelte „am Küchentisch“ die Haus- und gleichzeitig Tragwerksform des Ellipsoids mit dem Namen Futuro. Nach der Ausschreibung des Prototypen erhielt die Polykem Ltd., Helsinki (gegründet 1957, heute nicht mehr existent) den Zuschlag zur Realisierung *Home* (2002). Der Ingenieur Yrjö Ronkka war bei Polykem angestellt und überprüfte den Futuro daher erst zu diesem Zeitpunkt *Genzel/Voigt/Siponen/Suuronen* (02.06.2004). Der Prototyp wurde am 01.04.1968 auf dem Grundstück des Auftraggebers Hiidenkari errichtet *Home* (2002). Aufgrund der daraufhin einsetzenden starken Nachfrage beschloss die Firma Polykem, den Futuro in Serie herzustellen. Den Vertrieb übernahm die Firma Alco. In Finnland wurden bis 1978 20 Futuros hergestellt, weitere 15 Stück wurden im Ausland unter Lizenz gefertigt *Schwabe* (1969).

Tragwerk:

Die Ellipsoiden-Schale ist zusammengesetzt aus sechzehn Einzelementen, die an den Stegen miteinander verschraubt sind (Abb. 84 zeigt die Fügung der Schalenteile von innen, Abb. 85 zeigt die Verblendung dieser Fügung im Innenraum). Die Schale wird nicht durch sekundäre Tragwerke unterstützt, sie trägt die Lasten selbst auf den Stahlring ab. Die Schalenteile werden überwiegend durch geringe Membrankräfte beansprucht. Die Störungen der Membrantragwirkungen durch die elliptischen Öffnungen sind geringfügig. Die herausklappbare Treppe beeinträchtigt die Schalentragswirkung erheblich, hier wurden hohe Stege zur Versteifung angeordnet.

Die gesamte Konstruktion ruht auf einem Stahlring, der vierfach gestützt ist. Die unteren Segmente haben im Boden hochgezogene Stege, auf denen der Fußboden montiert wird. Der entstehende Hohlraum dient Installationszwecken. Das Tragwerk der Schale trägt alle Lasten über Normalkräfte ab. Die Aussteifung der Gesamtkonstruktion erfolgt über die schräg stehenden Stützen. Sie geben ihre Last in das Betonfundament ab.

statische Berechnung:

Yrjö Ronkka fertigte im Jahre 1967 eine statische Berechnung für das Futuro Haus an, die als vermisst gelten muss *Genzel/Voigt/Siponen/Suuronen (02.06.2004)*. Einblendungen aus dem Film zum Futuro Buch von Marko Home *Home (2002)* zeigen, dass die Bemessung nach Girkmann *Girkmann (1959)* erfolgte. Für den Ellipsoiden gibt Girkmann Bemessungsformeln für die Meridiankräfte n_φ und die Ringkräfte n_θ an, jeweils im Scheitel und am Äquator. Es sind die gleichen Formeln, die auch Timoshenko nennt, bei ihm heißen die Kräfte N_φ und N_θ *Timoshenko (1959), (1961)*.

Berechnungsverfahren:

nach *Girkmann (1959)*, Berechnungsalgorithmus nicht bekannt

In *Genzel/Voigt (2005)* wurde der statische Nachweis anhand der bekannten Größen nachvollzogen.

Belastungen:

Ermittlung der Eigenlasten anhand der Quellen *Schwabe (1969)* und *Görge (1969)*. Der Wandaufbau wird dort insgesamt mit 45 mm angegeben (je 2,5 mm Deckschichten und 40 mm PUR-Schaumkern). Nach Rücksprache mit Matti Suuronen wurde von ihm der Wandaufbau anders benannt (innen 3 mm, außen 5 mm Deckschichten sowie 50 mm Schaumkern) *Genzel/Voigt/Siponen/Suuronen (02.06.2004)*.

Ermittlung der Wind-, Schnee- und Verkehrslast nach *Home (2002)*.

Eigenlast	g_0	= 0,09 kN/m ²
Ausbaulast	g_A	= 0,96 kN/m ²
Verkehrslast	p	= 2,00 kN/m ²
Schneelast	s	= 2,00 kN/m ²
Windlast	$q_{w,D}$	= 1,0 kN/m ²

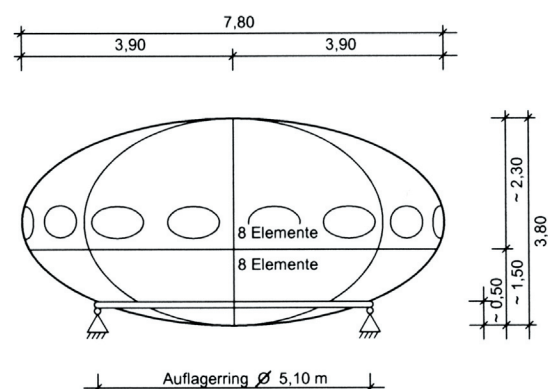
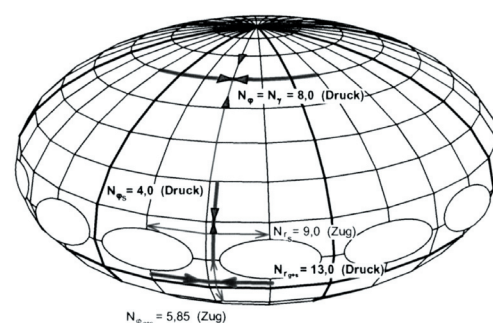
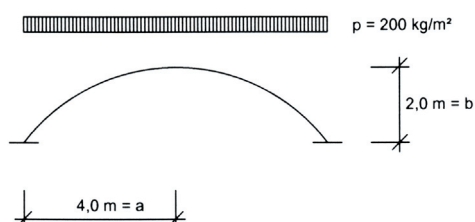


Abb. A 45 (unten) Einblendungen aus dem Film zum Buch von

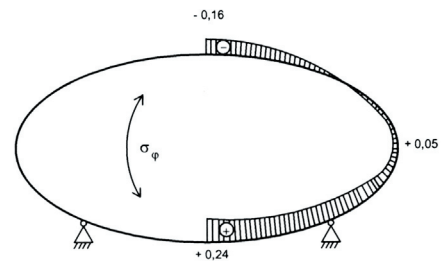
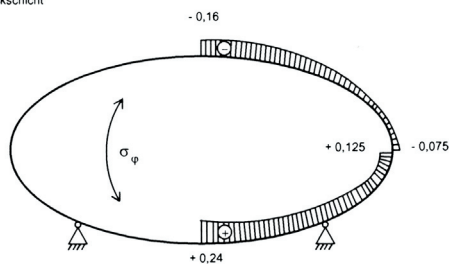
Home (2002) mit dem Lastansatz für Schnee

Abb. A 46 (rechts oben) Elementierung der Schalen

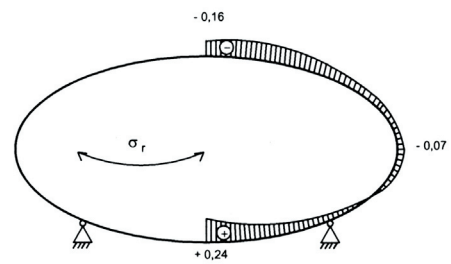
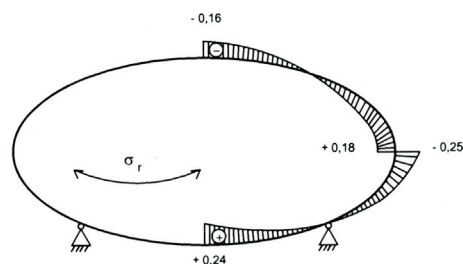
Abb. A 47 (rechts unten) Normalkräfte im Hauptlastfall $g+s+p$



Normalspannungen in
Meridianrichtung
 σ_φ (kN/cm²)
in der Deckschicht



Normalspannungen in
Ringrichtung
 σ_r (kN/cm²)



Schnittgrößen, Spannungen:

Normalkraftverteilung nach *Genzel/Voigt* (2005), 146

Normalspannungsverteilung nach *Genzel/Voigt* (2005), 148

Der Nachweis der kritischen Beullast wird erfüllt.

Abb. A 48 bis A51 A Normalspannungen
nach *Genzel/Voigt* (2005), 148

Herstellung und Errichtung:

Die Einzelteile des Futuro wurden durch die Firma Polykem wahrscheinlich im Handauflegeverfahren mit anschließendem Anpressen in einem Vakuumsack hergestellt. Die Schalungsformen bestanden aus GFK, Holz und einem stabilisierenden Stahlrahmen. Nach dem Ausschalen klebte man die exakt vorgeschrittenen PUR-Platten ein. Die auf der Innenseite verlaufenden Rillen (1 x 1 cm) mussten dabei geöffnet bleiben, um das entstehende Tauwasser abfließen zu lassen (eine Öffnungen dafür war vorgesehen). Abschließend wurden die oberen Glasfaserschichten im gleichen Verfahren aufgebracht. Das fertige Bauteil kam danach zum Tempern *Genzel/Voigt/Siponen/Suuronen* (02.06.2004). Bereits im Werk wurden die gekrümmten doppelschichtigen Acrylglasfenster mit einer Gummidichtung in die fertigen Bauteile eingesetzt *Home* (2002).

Der Aufbau des Futuro war ohne Kran von 4 Arbeitern in ca. 2 Wochen möglich, mit Kran dauerte die Montage ca. 2 Tage. Der Transport per Hubschrauber war möglich und äußerst werbewirksam *Home* (2002).

Abb. A 52, A 53 Aufbau für Werbeaufnahmen ca. 2000
Suuronen (2004)



Rondo

Lage: Prototyp in Basel, vierteiliges Ensemble in Radewald (D)

Jahr: Prototyp 1968, Ensemble Radewald 1972

Standdauer: Prototyp stationiert in Freiburg (D) bis heute (2005); Ensemble in Radewald seit 1999 leerstehend

Gebäudetyp: mobiles Ferienhaus mit 50 m² WFL

Ausführung: mehrmalige Ausführung

Bauherr: S.A. Bellavista MoNte Generoso (CH)

Architekt: Casoni & Casoni (CH)

Ingenieur: René Walther (CH)

ausführende Firma: Herst. Carlo Casoni (CH), Bauausführung Horlacher AG (CH)

Tragwerkstyp: einem Ellipsoiden angenäherte doppelt gekrümmte Schale (Luxopar), D = 8m, H = 4,20 m; auf innenliegendem Stahl-Trägerrost aufgelagert

Stützkernkonstruktion für Radewald 1972: d = 60 mm; Deckschichten 3 mm, Kern 54 mm Pur-Schaum



Abb. A 54 Rondo: vierteiliges Büroensemble, Radewald (D)

Abb. A 55 (unten) Schnitt Casoni & Casoni (2004)

Bibliographie:

Bilder einer Ausstellung. In: *Baumwelt* Heft 10 (1971), S. 1597

Büro Casoni & Casoni. Basel, 2004, Archivmaterial

Der „Wohnberg“ am Luganer See. In: *Hobby...die Zukunft miterleben* Heft 24 (1968), S. I-IV

Doernach, Rudolf: *ika '72 – 2. Internationale Kunststoff-Haus-Ausstellung der Welt*. Lüdenschied : 1972, S. 31. - Ausstellungskatalog

Doernach, Rudolf: *Bausysteme mit Kunststoffen*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1974

Firma König (Dietikon) (3. August 1971): Protokoll eines Diskussionsgesprächs

FOMEKK: Exkursion Schweiz, 2002, Archivmaterial

FOMEKK: Exkursion Firma Jalousien Gockl, Freiburg, 2004, Archivmaterial

FOMEKK: Exkursion Büro Casoni & Casoni, Basel, 2004, Archivmaterial

Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (10.03.2004, 17:00-17:10 MEZ): Gespräch mit René Walther

Genzel, Elke; Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (18.03.2004, 10:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Herrn Gockl, Freiburg

Genzel, Elke (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (12.08.2004, 14:00-14:10 MEZ): Gespräch mit dem Sekretariat des Büro Walther Mory Maier Bauingenieure AG, CH – 4142 Münchstein, Postadresse = Postfach CH-4023 Basel

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005

Hubschraubertransport?. In: *Detail* Heft 6 (1969), S. 1253/1254

Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V. (Hrsg.): *Kunststoffhäuser und Raumzellen*. Darmstadt : IBK-Verlag, 1973

Jackson, Lesley: *the sixties*. London : Phaidon Press, 2000

Krochmal, G.: Kunststoffe am Bau, Entwicklung und Stand der Verwendung. In: *Der Architekt* Heft 9 (1971), S. A 442–A 452

Öffentliche Baumapre der Ostschweiz, 1971/72

Rondo - Selbsttragende Schale und innenliegende Tragkonstruktion – Statik. Statische Berechnung des Büro Dr. Walther & Mori für die CSB Constructa System_Bau AG, Wettersteinallee 141, CH- 4058 Basel vom Dez. 1971

Überblick: Probewohnen in einer „Stadt aus Kunststoff“. In: *Baumwelt* Heft 4 (1971), S. 588

Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (21.06.2004, 12:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Herrn Dante Casoni, Basel, CH

Vorstatik Rondo. Statische Berechnung Ing. Dr. Walther , Seite 1-18, ohne Datum

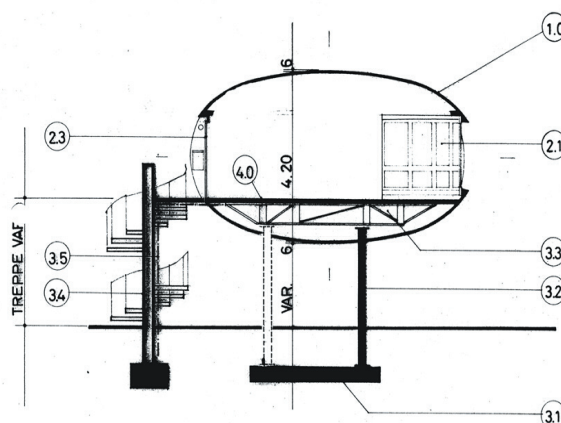
Zustandekommen des Projektes:

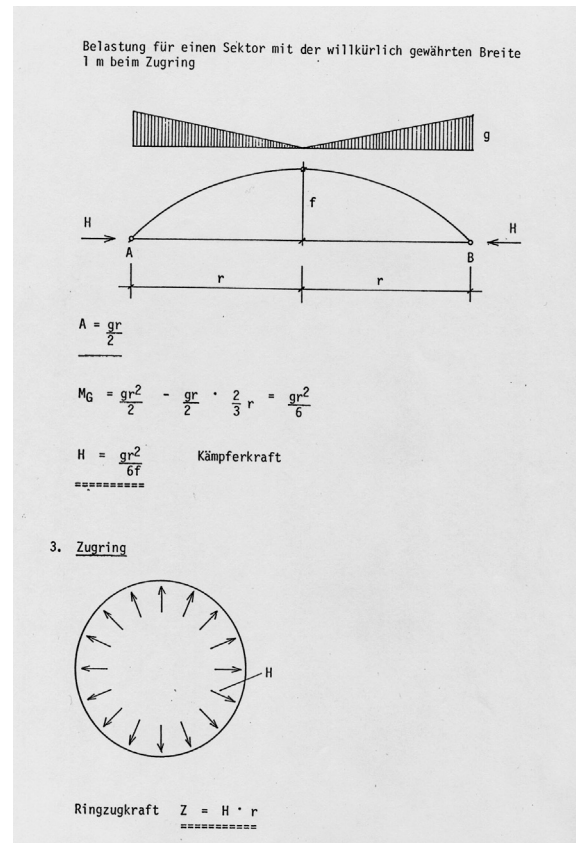
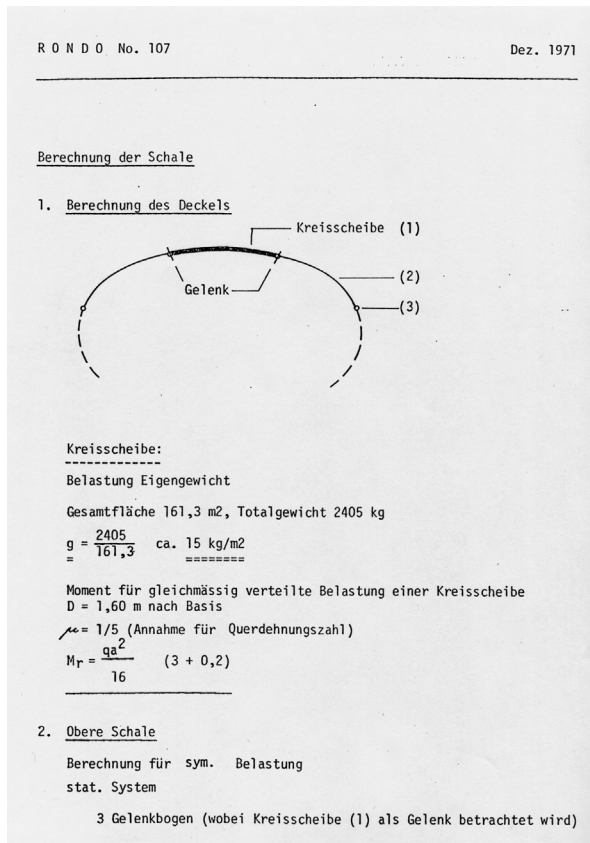
1962 begann die Firma S.A. Bellavista Monte Generoso (Inhaber zahlreicher Gaststätten und Landparzellen auf dem Monte Generoso im Tessin) mit der Ausarbeitung eines Zonen- und Gesamtüberbauungsplanes als Fremdenverkehrsort. Das Büro Casoni & Casoni erhielt den Auftrag, die Ferienhaussiedlungen zu entwickeln. Neben anderen tradierten Haustypen entwickelte Angelo S. Casoni den Kunststoffbungalow Rondo. Der Prototyp wurde auf der 53. Mustermesse Basel (MUBA 1969) erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt. Trotz Vertriebsbemühungen seit 1970 fand sich nur ein Käufer, für den das vierteilige Ensemble in Radewald (D) 1972 hergestellt wurde *FOMEKK, Basel (2004)*. Der Prototyp wurde ebenfalls verkauft und ist heute in ein Firmenensemble in Freiburg integriert.

Tragwerk: Rondo (1971)

Das Rondo besteht aus einer selbsttragenden Schale aus glasfaserverstärktem Kunststoff, ausgeführt als Sandwich. Sie gibt ihre Lasten auf einen sternförmig angeordneten Trägerrost aus Stahl ab. Der Trägerrost nimmt zusätzlich die Verkehrslasten des Bodens auf, der auf ihm ruht, und leitet alle Lasten an die Stützen ab. Die Stützen werden unten im Fundament und oben in den Trägerrost eingespannt. Somit ist auch die Aussteifung festgelegt. Das Gebäude ist stabilisiert durch die Rahmentragwirkung, die sich aus der biegesteifen Verbindung von Stützen und Stahlträgerrost ergibt.

Im Vergleich zum Tragwerk des Futuro besitzt die





Schale des Rondo z.T. deutlich geringere Krümmungsradien (doppelt so flach), die Schale ist somit gegen Ausbeulen empfindlicher. Ausbeulungen am Prototypen waren festzustellen FOMEKK, Freiburg (2004)..

Statische Berechnung: Rondo (1971), Vorstatik Rondo

Nur für das vierteilige Ensemble in Radewald wurde eine statische Berechnung erstellt. Aufsteller ist René Walther als Mitarbeiter des Büros Walther Mory Maier Bauingenieure AG in Basel, welches seit 1963 existiert Genzel (12.08.2004). Walther trifft in der Bemessung einige Vereinfachungen, die seinem damaligen Kenntnisstand Rechnung tragen, nämlich ein detailliertes Wissen über die mechanischen Vorgänge beim Werkstoff Stahlbeton und geringes Wissen über die Eigenheiten beim Konstruieren mit faserverstärkten Kunststoffen sowie geringes Wissen über das Tragverhalten von Schalen. Walther vereinfacht den oberen und unteren Schalendeckel zu einer runden Platte und die obere wie die untere halbe Kugelkalotte zu einem Dreigelenkbogen.

Belastungen:

aus Vorstatik Rondo

$$g = 15 \text{ kg/m}^2$$

$$s = 500 \text{ kg/m}^2, \text{ Schneelast bei } H = 1500 \text{ m}$$

$$\text{gesamt } q = 515 \text{ kg/m}^2$$

aus Rondo, Statik (1971)

$$\text{LF 1: } g = 15 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{LF 2: } g + s = 15 + 100 = 115 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{LF 3: } g + s = 15 + 200 = 215 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{LF 4: } g + s = 15 + 700 = 715 \text{ kg/m}^2$$

Die Belastung des Rondo mit 700 kg Schnee pro Quadratmeter wurde um das 3,5-fache höher angesetzt als bei den anderen Ferienhäusern (Futuro, Bulle Six Coque), die ebenfalls im Gebirge zu stehen kamen.

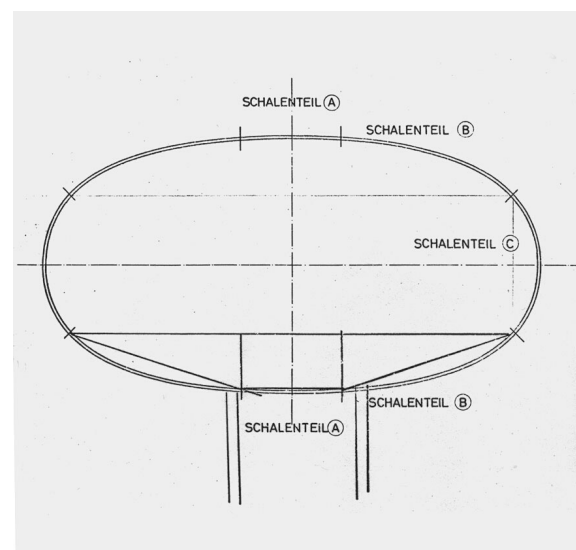


Abb. A 56 und A 57 (oben) Auszug aus der statischen Berechnung Rondo (1971)

Abb. A 58 (unten) Querschnitt mit Elemententeilung Rondo (1971)

Schnittgrößen, Spannungen: *Vorstatik Rondo*

Schalenteil A_ Es wird eine Kreisplatte mit einem Durchmesser von 1,60 m nach R. Bares: „Berechnungstabellen für Platten und Wandscheiben“, bemessen. Das Moment als Funktion der Belastung, des Radius und der Querdehnzahl 0,20 ermittelt sich aus der Gleichung:

$$M_r = \frac{q \times a^2}{16} (3+0,2) \quad (\text{ro 1})$$

$$M_r = 67 \text{ kgm} = 0,67 \text{ kNm}$$

Der Widerstand des Sandwiches gegenüber dieser Beanspruchung wird aus dem Anteil der einzelnen Schichten und dem Steineranteil ermittelt. Voraussetzung dafür ist die schubfeste Verbindung von Deckschichten und Kern. Die daraus resultierende Druck- und Zugspannung in den 3 mm dicken Deckschichten beträgt 41 kg/cm², im Schaumkern 0,34 kg/cm². Es wird kein Vergleich mit zulässigen Spannungen geführt (Abb. 56).

Schalenteil B_ Bemessen wird ein Dreigelenkbogen mit einer Last aus Eigengewicht und Schnee, die vom Gelenk zu den Auflagern hin dreieckförmig ansteigt. Aus den Auflagerkräften des Dreigelenkbogens wird die Druckkraft in der Schale bestimmt. Sie beträgt 1,60 t/m und erzeugt eine Druckspannung von 27 kg/cm² (0,27 kN/cm²). In einer weiteren Lastkombination wurde auch eine einseitige Schneelast berücksichtigt. Die Beanspruchung ist fünf mal größer als bei symmetrischer Belastung.

Die Horizontalkraft des (räumlichen) Dreigelenkbogens wird von einem Zugring aufgenommen. Der Schalenteil B schließt mit einem Randbalken ab, der die Zugkraft (in der Originalstatik als Kämpferkraft bezeichnet) aufnimmt. Die Kämpferkraft beträgt 5 t, die Zugspannung daraus 200 kg/cm² (2 kN/cm²) (Abb. 57).

Die Vertikalkraft des Dreigelenkbogens belastet den Randbalken zusätzlich auf Biegung. Die Spannung erhöht sich um 430 kg/cm² auf 630 kg/cm² (6,3 kN/cm²).

Die Vergleichswerte für die zulässige Spannung entnehmen wir dem Protokoll der *Firma König (03.08.1971)*, die ermittelte Kurzzeitfestigkeit beträgt demnach 16–19 kN/cm². Berücksichtigt man noch die werkstoffeigenen Abminderungen A1 bis A4 von gesamt mindestens 2,0 und einen allgemeinen Sicherheitsbeiwert von mindestens 1,75, so ergibt sich die zulässige Spannung zu:

$$4,6 \text{ kN/cm}^2 < \text{zul} < 5,4 \text{ kN/cm}^2$$

Die vorhandene Spannung wird unwesentlich überschritten.

Schalenteil C (Wände und Stützen)_ Nachweis der Pfosten zwischen den Fenstern. Es sind Druckglieder aus faserverstärktem Kunststoff. Ihr Nachweis ist konventionell.

Die vertikale Kraft in den Wänden und die Spannung in den Deckschichten ergibt sich zu 245 kg/cm² (2,45 kN/cm²), in den Stützen zu 205 kg/cm² (2,05 kN/cm²).

Die Bodenkonstruktion und Stützen aus Stahl werden für die Bemessung nicht näher betrachtet.

Material:

Stützkernkonstruktion:

GFK – Polyurethanschaum – GFK

3 mm – 54 mm – 3 mm

Beim Prototypen bestand der Kern aus Mineralwolle, entsprechend ergab sich trotz der durch Stege verbundenen Deckschichten ein erhöhtes Stabilitätsproblem. Die Deckschichten beulten aus *Genzel/Voigt (2005)*, 182.

Als Harz wurde verwendet: Polylite 8007/flüssig) + Härter BP 50 (Paste) + Aktivator DM (flüssig).

5 kg/m² für 3 mm (75 %) Harz

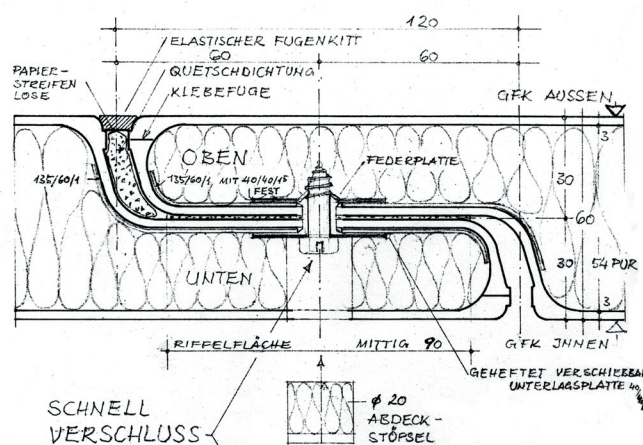
0,174 kg/m² für 3 mm Härter

0,174 kg/m² für 3 mm Aktivator

Das Glas ist Roving Cevetex, 1,4 kg/m² (ergibt einen Faseranteil von 25 %).

Dies ergeben Materialkosten von 18,50 SFr./m² pro Sandwichschicht.

Abb. A 59 Fugendetail von 1970 Casoni & Casoni (2004)



Mechanische Kennwerte des GFK nach *Firma König (03.08.1971)*,

Festigkeiten aus Kurzzeitbelastung am Probelaminat der Platte, GF-Anteil 25 %:

Zug_z = 1 600 – 1 900 kg/cm² = 16 – 20 kN/cm²

Druck_D = 2 000 – 2 600 kg/cm² = 20 – 26 kN/cm²

E-Modul E = 80 000 – 90 000 kg/cm² = 800 – 900 kN/cm²

Auffällig ist, dass wesentlich höhere Festigkeiten ermittelt wurden als jene, die beim fg 2000 oder beim Futuro im Versuch gemessen wurden.

Zum Vergleich folgend die Werte des fg 2000:

GFK Mattenlaminat mit 30 % Glasgehalt:

z = 10,0 kN/cm²

D = 12,0 kN/cm²

E_{zug} = 900 kN/cm²

Herstellung und Errichtung:

„Die Herstellung des Prototyps erfolgte in 5 Schritten [(Abb. 60 bis 63)]. Zunächst mußte die Negativform für einen Viertelteil der Schale gebaut werden. Dieses erfolgte mittels einer Metallrichte, eines Bogens, welche, an eine Hauswand geschraubt, das erwünschte Bogenmaß sicherte. Der Unterbau war billigster Natur: Holz, welches die grobe Form modellierte. Die exakte Rundung erreichten sie durch Aufspritzen von Gips. Über diese Konstruktion wurde nun das erste Mal im Faserspritzverfahren laminiert, inklusive der ersten Schicht aus Formenharz. Ein an der Rückseite angebrachtes Gerüst aus Stahlrohren sicherte die Steifigkeit und die Standsicherheit der entstandenen Negativform. In dieser erfolgte nun, ebenfalls im Faserspritzverfahren die Herstellung einer Positivschalung, einer Viertelschale. Im folgenden wurde in der Negativschalung die Außenschalen des Prototypen laminiert. Die Positivschalung hingegen, wiederum mit Stahlrohren unterstützt, wurde nun anstelle der Holzschalung unter den Richtbogen gestellt. Diese benötigt für die Herstellung der Innenschalen des Prototyps aber eine kleinere Krümmung, entsprechend dem Abstand der Dämmschicht verringert. Die separat hergestellten Außen- und Innenschalen wurden mit Mineralwolle gefüllt (Abb. oben), wobei vorher GFK-Hohlprofile als Abstandhalter eingeklebt wurden. In der Ausführung des Bürokomplexes wurde PUR-Schaum als Dämmung genutzt. Dadurch sparte man sich die Abstandhalter und konnte ein vollflächiges Sandwich herstellen.“ *Genzel/Voigt (2005), 181*



Abb. A 60 bis A 63
Herstellung des Prototypen
1969
Casoni & Casoni (2004)



fg 2000

Lage: Altenstadt (D)

Jahr: 1968

Standdauer: bis heute (2005)

Gebäudetyp: Wohnhaus mit 160 m² WFL

Ausführung: mehrmalige Ausführung (35)

Bauherr: FG Design, Wolfgang Feierbach, Altenstadt

Entwurf: Wolfgang Feierbach, Altenstadt

Ingenieur: Gerhard Dieterich, Carsten Langlie (D)

ausführende Firma: Herst. FG Design, Wolfgang Feierbach, Altenstadt

Tragwerkstyp: Rahmentragwerk, auf Betonsockel aufgesetzt

Stützkernkonstruktion d = 70 mm; Deckschichten 6 und 4 mm, Kern 60 mm

Pur-Schaum



Abb. A 64

Ansicht fg 2000, 1969 Feierbach/Misske (1970)

Bibliographie:

Balkowski, D.: Das Kunststoffhaus als Konstruktionsform. In: *Deutsche Bautechnik* Heft 2 (1962), S. 118-119

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM): Prüfungszeugnis, Aktenzeichen 2.2/15 665, 3. Ausfertigung, Antrag vom 22.9.1971, Antragsteller Firma Wolfgang Feierbach in Altenstadt (Hessen): Bauteil- und Materialprüfungen für den Antrag auf bauaufsichtliche Zulassung des Bausystems fg 2000

Dieterich, Gerhart: *Statische Berechnung für das fg 2000*, Mainz, nicht datiert, ca. 1967

Dieterich, Gerhart: *Statische Berechnung für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Kunststoffhaus FG 2000*, Mainz, Oktober 1972, Nr. 71038

Der Hessische Minister des Inneren: *Zulassungsbescheid für das Bausystem fg 2000 aus glasfaserverstärktem Polyesterharz*; Zulassungsnummer: VA2-64b08/33-111/73, Wiesbaden : 12. Oktober 1973

Doernach, Rudolf: *ika '72 – 2. Internationale Kunststoff-Haus-Ausstellung der Welt*. Lüdenschied : 1972, S. 31. - Ausstellungskatalog

Domke, H., Rübben, A.: Allgemeines Berechnungsverfahren für tragende Kunststoffkonstruktionen aus GF-UP-Mattenlaminaten, In: *Bauingenieur* 52 (1977), S. 205-210

Domke, H.; Rübben, A.: *Kunststoffbau*. Wiesbaden und Berlin : Bauverlag, 1981

Einsfeld, Ulrich: Beurteilung von Kunststoffen vom Standpunkt der Bauaufsicht. In: *plasticconstruction* Heft 1 (1973), S. 17-19

Feierbach, Wolfgang; Misske, M.: *Kunststoffhaus fg 2000*. fg design : 1970, Planungsmappe,

Feierbach, Wolfgang: *Zulassung Bausystem fg2000*. Altenstadt : 1973, Presseinformation

Feierbach, Wolfgang: fg 2000 – Planung, Konstruktion, Herstellung. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1973), S. 212-217

Feierbach, Wolfgang: Rastersystem für Kunststoffhäuser. In: *Baumwelt* Heft 2 (1974), S. 64-69

Feierbach, Wolfgang, Altenstadt/Hessen, 2004, Archivmaterial

FOMEKK: Diasammlung fg 2000. Weimar, 2001, Archivmaterial

Genzel, Elke; Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterinnen, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (02.09.2001, 10:00-13:00 MEZ): Gespräch mit Frau Feierbach

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbanten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar: Universitätsverlag, 2005

Hintersdorf, Gert: *Stützstoffbauweise*. Dresden : Institut für Leichtbau, 1965

Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Praktische Dimensionierungsverfahren für tragende GFK-Bauteile. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1966), S. 847-854

<http://www.feierbach.com>

IBK Bibliothek: Sammlung SL 7.70. Ludwigshafen, 2004, Archivmaterial

Künzel, H.: Müssen Wände und Decken absorptionsfähig für Wasserdampf sein? In: *Bauen mit Kunststoffen* Heft 2 (1972), S. 93-96

Kunststoffhaus fg 2000. Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn – Nr. 04.001, Bad Godesberg : 1973

Langlie, Carsten: *Statische Berechnung für „fg 2000“*. Berlin, Februar 1973, mit Prüfstempel von Dieterich, Gerhart, Mainz, 16.3.1973, Prüfnummer 909.73.638, Rheinland-Pfalz

Langlie, Carsten : fg 2000 – Planung, Konstruktion und Berechnung. In: *plasticconstruction* Heft 5 (1973), S. 221-224

Langlie, Carsten: Die Brauchbarkeit von GF-UP-Konstruktionen unter Dauerbelastung erläutert am Beispiel „fg 2000“. In: *Kunststoffe im Bau* Heft 4 (1978), S. 145-148

Letzte Seite: fg 2000. In: *Baumwelt* Heft 49 (1969), S. 1796

Ludwig, Matthias: *Mobile Architektur*. Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1998

Ludwig, Matthias: ... in die Jahre gekommen, ein Wohnhaus aus Kunststoff. In: *db deutsche bauzeitung*, Heft 7 (1998), S. 76-80

Saechling, Hansjürgen; Schwabe, Amtor: *Bauen mit Kunststoffen*. Berlin : Ullstein Verlag, 1959

Schwarz, Otto: *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*. Würzburg : Vogel Verlag, Kamprath Reihe, 1975

Timoshenko, S.; Gere, J.: *Theory of Elastic Stability*. 2. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1961

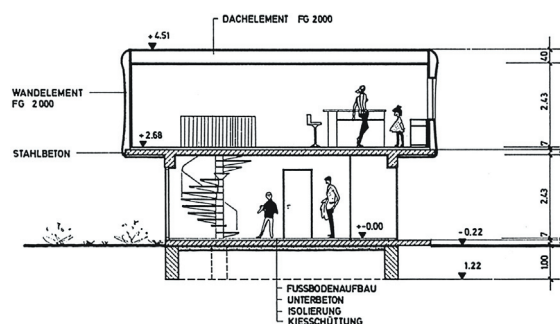
Wende, A.; Bernert, J.; Hintersdorf, G.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke aus schalenförmigen und gekrümmten GFK-Fertigteilen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 899-902

Zustandekommen des Projektes: www.feierbach.com, Feierbach/Misske (1970)

Wolfgang Feierbach besaß in Altenstadt eine Werkstatt, wo er Möbel aus GFK herstellte. Von der Erreichung hoher Steifigkeit des Materials überzeugt, entwickelte er ohne fremde Hilfe allein durch Tests die realisierbare Idee eines serienfertigen Hauses mit tragenden Elementen aus FVK. Um sein Produkt marktfähig zu machen, beantragte er einen Forschungszuschuss beim Bundesministerium und erwarb 1973 nach 5 jähriger Untersuchung, die auch die dezidierte statische Berechnung beinhaltete, eine Zulassung für sein Bausystem fg 2000.

Abb. A 65

Schnitt durch das Wohnhaus fg 2000 *Kunststoffhaus fg 2000* (1973)



Tragwerk:

Rahmentragwerk auf Betonsockel, tragend sind die 40 cm hohen Randaufkantungen (Stege) der Decken- bzw. Wandplatten. Die Wand und Deckenplatten in Stützkernbauweise sind entsprechend nur mittragend bzw. aussteifend. Ihre Breite von 1,25 m ergab sich exakt aus einer Mattenbreite des Glasfaserlaminats.

In der Vorbemessung von *Dieterich* (ca. 1967) wird das statische System noch als Träger auf zwei Stützen gesehen, die statische Untersuchung parallel zur Zulassungsuntersuchung *Langlie* (16.03.1973) geht bereits von einem Rahmensystem aus.

Rahmenstützweite: 10,55 m, Rahmenhöhe: 2,95 m

Statische Berechnung:

Die Bemessung des Tragwerkes des fg 2000 hat verschiedene Stufen durchlaufen. Dabei hat sich die Bemessung ständig verfeinert. Mit Einflussnahme der behördlichen Institutionen besonders während der Forschungsarbeit zwischen 1968 und 1973 wurden die werkstoffspezifischen Abminderungsfaktoren erstmals eingeführt. Nachfolgend steht ein Überblick über die Entwicklungsschritte bei der Bemessung.

Grundsätzlich sind alle Bemessungen nach den Regeln der klassischen Festigkeitslehre geführt. Es werden Belastungen (Normenwerte) auf das Tragwerk gesetzt und Beanspruchungen ermittelt. Die Beanspruchungen (Momente, Normalkräfte) werden den Widerständen ($E \times I$) gegenübergestellt, je nach Fortschreiten des Projektes werden diese Widerstände gröber oder genauer ermittelt. Die Querschnittswerte (I) werden nach dem Satz von Steiner ermittelt. Aus der Gegenüberstellung von Beanspruchung und Widerstand ergeben sich Spannungen, die kleiner als die zulässigen Spannungen sind.

Dieterich (ca 1967):

ursprüngliche statische Bemessung, aufgestellt von Dipl.-Ing. G. Dieterich, Mainz

Träger auf zwei Stützen. Die tragenden Elemente sind die äußere 6 mm GFK-Schicht und der 6 mm dicke, 40 cm hohe Steg, die innere 4 mm GFK-Schicht und die 6 cm Hartschaumdämmung sind als nicht tragend angesetzt. Es wird der Spannungsnachweis geführt, die zulässigen Spannungen erhält Dieterich aus den geschätzten Werkstoffkennwerten nach *Hintersdorf/Bernert/Wende* (1966) und einer geschätzten Abminderung von insgesamt 6,0. Beim Nachweis des Beulens wird ein Sandwich angesetzt, was später durch *Feierbach* als nicht herstellbar widerlegt wird.

verwendete Berechnungsgrundlagen:

DIN 1055, 1052; vorläufige Richtlinien für glasfaserverstärktes Polyesterharz; *Hintersdorf* (1963); *Hintersdorf/Bernert/Wende* (1966); *Wende/Bernert/Hintersdorf* (1965)

Dieterich (Oktober 1972):

Es ist die zweite Berechnung von G. Dieterich unter Annahme eines Rahmentragwerkes. Diese Berechnung wird nie wieder irgendwo verwendet, denn Dieterich und Langlie tauschen Monate später die Rollen. Dieterich wird zum Prüflingenieur von Langlies Statik, die zeitgleich entsteht.

Es wird nur der allgemeine Spannungsnachweis für den Rahmen geführt und die Verbindung der Rahmenecke nachgewiesen. Es gibt keine Beuluntersuchung, keine Durchbiegungsbemessung,

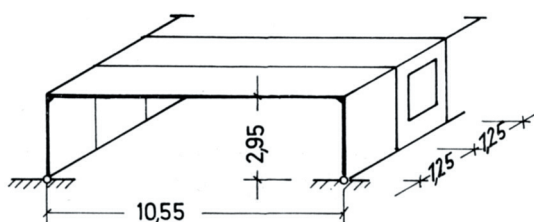


Abb. A 66
statisches System (Rahmen) des fg 2000 nach der Berechnung von
Langlie Langlie (1973)

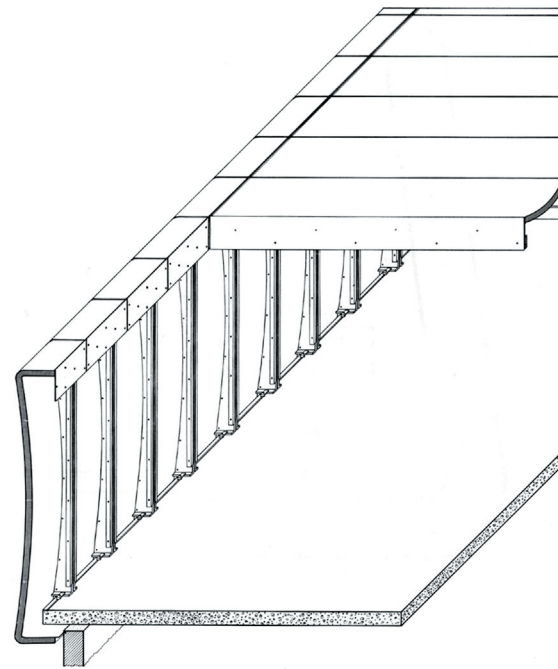


Abb. A 66
tragende Dach- und Wandelemente beim Wohnhaus fg 2000
Feierbach/Miske (1970)

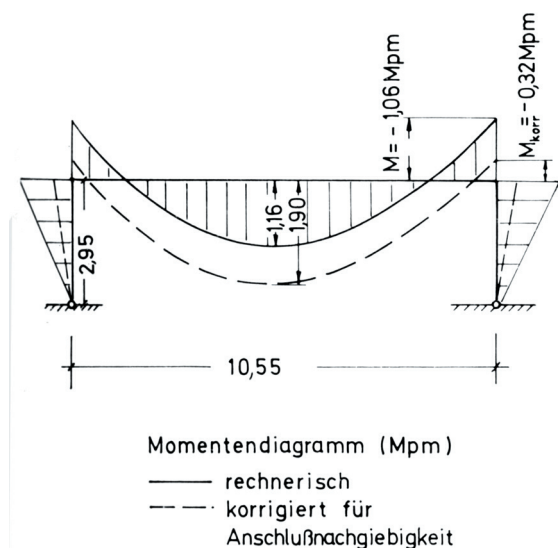
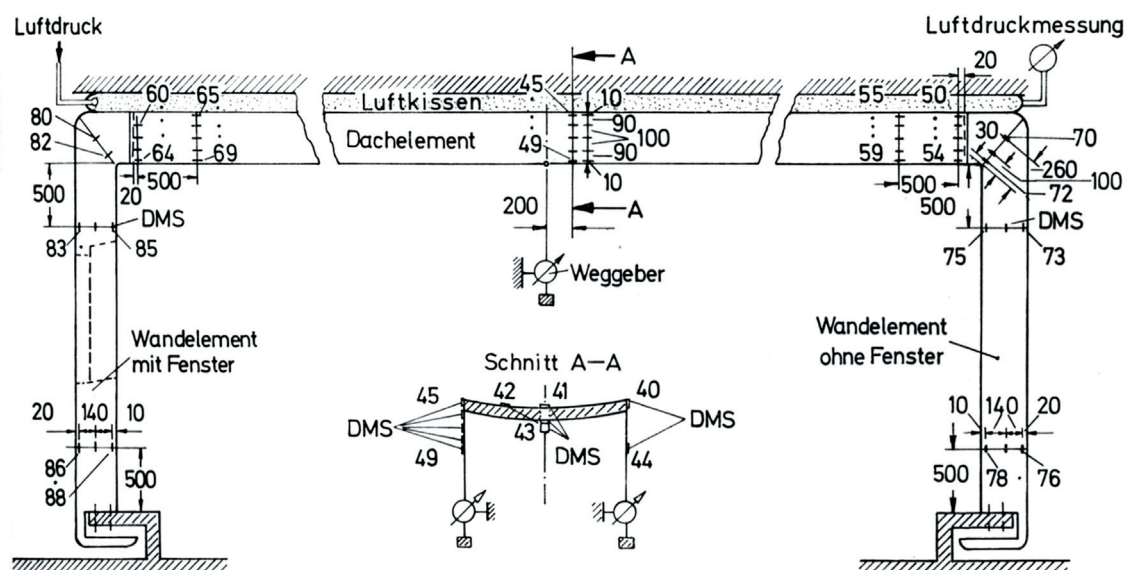


Abb. A 67
Beanspruchung des Rahmens nach der Berechnung und den
Testserien von *Langlie Langlie* (1973)



Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden für das Bausystem fg 2000

Kriterium	1967 <i>Dieterich (ca 1967)</i> , enthalten in <i>Feierbach/ Misske (1970)</i> G. Dieterich, Mainz: Planungs- und Konstruktionsbüro	1972 <i>Dieterich (Oktober 1972)</i> G. Dieterich für Planungsgruppe Menges, Caemmerer, Schwabe: Forschungsarbeit im Auftrag des Bundesministeriums für Bau	1973 <i>Langlie (1973)</i> Carsten Langlie, Ingenieurbüro für Bauwesen AIV Berlin	1978 <i>Langlie (4/1978)</i> Carsten Langlie
abgedruckt in	„Kunststoffhaus fg 2000“, Planungsmappe der Firma fg design von Wolfgang Feierbach, Altstadt	„Kunststoffhaus fg 2000“, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Heft 04.001, 1973	„plasticconstruction“, Heft 5 1973, Seite 221-224 [FB 21] (in Auszügen)	„Kunststoffe im Bau“, Heft 4 1978, Seite 145-148
Lastannahmen [kN/m ²]				Höchstlast/ Kriechlast [q/q _{cr}]
1. Vertikallasten Dach				
Eigengewicht	0,30	0,29	0,31	0,31
Sandwich	0,26	0,16	0,21	0,21
Ausbaulast	0,56	0,45	0,52	0,52/0,52
Summe ständige Last	0,94	0,76	0,75	0,75/0,34
Schneelast	1,50	1,21	1,27	1,27/0,86
Gesamtlast				
2. Horizontallasten				
Windlast	0,60	0,96	0,60	0,60
Schiefstellung	8,75 kN	8,75 kN		
statisches System	Dach: Balken l = 10,0 m nur für Aussteifung: Rahmen H/l = 10,0/3,50	Rahmen H/l = 10,0/3,50	Rahmen H/l = 10,55/2,95	Rahmen H/l = 10,55/2,95
Schnittgrößen/korr. Schnittgrößen [kNm, kN]				wie Spalte 4
1. ständige Last	M _{Feld} = 7,0 M _{Eck} = - max A = 2,8 max H = -	M _{Feld} = M _{Eck} = max A = max H =	M _{Feld} = M _{Eck} = max A = max H =	
2. ständige Last + Schnee	M _{Feld} = 18,80 M _{Eck} = - max A = 7,50 max H =	M _{Feld} = 19,65 ohne Einspannung M _{Eck} = 7,14 max A = 10,0 max H = ±2,04	M _{Feld} = 11,60 / 19,00 ¹⁾ / 22,00 ²⁾ M _{Eck} = 10,60 / 3,20 max A = 8,44 / 8,44 max H = 3,60 / 1,09	
3. ständige Last + Schnee + Wind	M _{Feld} ≈ 0 M _{Eck} = 3,17 (nur w) max A = 0,90 (nur w) max H = 0,58 (nur w)	M _{Feld} = 19,65 o. Einsp. M _{Eck} = 10,98 max A = 10,74 max H = 5,19	M _{Feld} = M _{Eck} = 14,30 max A = 8,70 max H = 5,2 f = 3,90cm ¹⁾ Versuchswerte mit nachgiebiger Rahmenecke ²⁾ Rechenwert für Einfeldträger	f = 2,10 cm
die rechn. Schnittgrößen sind am Rahmen mit b = 1,25 m bei 100% Ecksteifigkeit ermittelt, die korrigierten Schnittgrößen berücksichtigen die Nachgiebigkeit der Verbindung (nach Versuchsmessung)				
Querschnittswerte (Hartschaum und Innenschicht statisch unwirksam)	Ansatz: T-Träger; Satz von Steiner	Ansatz: T-Träger; Satz von Steiner	Ansatz: E×I der Teil- Querschnitte	Ansatz: E×I der Teil- Querschnitte
I _{Dach} cm ⁴	21 700 e _o = 10,85 cm	25 050 e _o = 11,5 cm	E×I _D = 54 513 × 10 ³ kNcm ² e _o = 18,5 cm	E×I _D = 60 570 × 10 ³ kNcm ² e _o = 18,5 cm
W _{Dach} cm ³	W _o = 2 000 W _u = 745	W _o = 2 180 W _u = 880		

Materialkennwerte Ermittlung nach	a) Gerd Hintersdorf: Stützstoffbauweise, IfL, Dresden 1965 b) vorläufige Richtlinien für glasfaserverstärktes Polyesterharz	nicht bekannt	a) Gerd Hintersdorf: glasfaserverstärkte Plasten, Staaken 1969, Firmenschrift b) Versuchsdurchführung	a) Domke/ Rübben: Allg. Berechnungsverfahren für trag, Kunststoffkonstr. aus GF-UP- Mattenlaminaten. Bauingenieur, 1977, Seite 205-210, Tabelle [5] b) Versuchsdurchführung
Materialkennwerte Laminat: trag./Kern/n.tr. Glasgewicht γ (kN/m ³) $E_{\text{trag,Deck}}$ (kN/cm ²) $G_{\text{Hartschaum}}$ (kN/cm ²) $\sigma_{\text{Zug,Bruch}}$ (kN/cm ²) = $\beta_{\text{Zug,Bruch}}$ $\sigma_{\text{Druck,Bruch}}$ (kN/cm ²) τ (kN/cm ²) μ α_i K ⁻¹ $n = s$ allg. Sicherheit φ (-) α_φ α_0	6 mm/ 60 mm/ 4 mm 30 % 800 1,125 (sic!) 15,0 15,0 4,0 0,33 2,5	6 mm/ 60 mm/ 4 mm 31 % 14,50 700 ($E_{z,D}$) 0,50 ($E_{z,K}$) 0,15 9,0 ($\sigma_{z,D}$) 15,0 ($\sigma_{z,Steg}$) - 0,40 (τ_{kleber}) 7,0 (τ_D) Bruch 2,5; Beulen 2,0	6 mm/ 60 mm/ 4 mm 30 % 15 (γ_D), 25,3 (γ_{Steg}) 900 / 970 ; 7300 (E_{Steg}) - 10,0 / 10,17; 14 ($\sigma_{z,Steg}$) 12,0 / - - Bruch 2,5; Beulen 2,0 <i>kursive Werte infolge nachgiebiger Rahmenecke</i>	6 mm/ 60 mm/ 4 mm 37 % 800 (bei 23 °) - 11 (bei 23 °) - - Bruch 2,5; Beulen 2,0 0,5 1,0 0,80
Bemessungsalgorithmus	Ermittlung der zul. Spannungen aus der Kurzzeitfestigkeit, abgemindert durch einen geschätzten Abminderungsbeiwert (allg. und werkstoffabhängige Abminderungen) $\text{zul } \sigma = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{v_{\text{Bruch}}}$ σ_{Bruch} Kurzzeitfestigkeit v_{Bruch} Abminderung (allgemein und werkstoffspezifisch für Dauerbelastung)	Ermittlung der zul. Spannungen aus der Kurzzeitfestigkeit, abgemindert durch allg. Sicherheitsbeiwert und Abminderungsfaktoren $\text{zul } \sigma = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{s \times \Lambda_1 \times \Lambda_2 \times \Lambda_3 \times \Lambda_4}$ σ_{Bruch} Kurzzeitfestigkeit s allg. Sicherheitsfaktor Einzelabminderungen A1=1,6 Dauerlast A2=1,2 Alterung A3=1,1 Temperatur A4=1,2 Fertigungsdifferenzen	Ermittlung der zul. Spannungen aus der Kurzzeitfestigkeit, abgemindert durch allg. Sicherheitsbeiwert und Abminderungsfaktoren $\text{zul } \sigma = \frac{\sigma_{\text{Bruch}}}{s \times \Lambda_1 \times \Lambda_2 \times \Lambda_3 \times \Lambda_4}$ σ_{Bruch} Kurzzeitfestigkeit s allg. Sicherheitsfaktor Einzelabminderungen A1=1,8 (2,0) Dauerlast A2=1,2 Alterung A3=1,1 Temperatur A4=1,2 Fertigungsdifferenzen	Ermittlung der zul. Spannungen aus der Kurzzeitfestigkeit, abgemindert durch allg. Sicherheitsbeiwert und Abminderungsfaktoren, für Dauerlast und Temperatur durch Kriechfaktoren nach reolog. Modellversuch $\sigma_{z,Br} = \frac{\alpha_0 \times \beta_z (23^\circ)}{s \times (1 + 2 \times \frac{q_{cr}}{q}) \times \varphi \times \alpha_\varphi}$ $\sigma_{z,Br} = \frac{0,8 \times 110}{2 \times (1 + 2 \times \frac{0,86}{1,27} \times 0,5 \times 1)}$ β_z Kurzzeitfestigkeit s allg. Sicherheitsfaktor φ Kriechzahl für 23° α_φ Abminderung für Kriechen, beliebige Temperatur α_0 Abminderung für beliebige Temperatur
Bemessung	zul σ = 15,0/6 = 2,5 kN/cm ² ≥ vorh $\sigma_{z,D}$ = 1 880/745 = 2,52 kN/cm ²	zul $\sigma_{z,D}$ = 9,0/ (2,5×2,5) = 1,44 kN/cm ² zul $\sigma_{z,Steg}$ = 15,0/ (2,5×2,5) = 2,40 kN/cm ² vorh $\sigma_{z,D}$ = 1 965/2 180 = 0,90 kN/cm ² vorh $\sigma_{z,Steg}$ = 1 965/880 = 2,23 kN/cm ²	zul σ_D = 12,0/ (2,5×2,85) = 1,68 kN/cm ² zul σ_z = 10,0/ (2,5×2,85) = 1,40 kN/cm ² vorh σ_z = 2 200/ (54 513 ×10 ³ ×900×18,5 = 0,67 kN/cm ² = 2 200/ (54 513 ×10 ³ ×900×21,5 = 0,79 kN/cm ²	zul $\sigma = \sigma_{z,Br}$ = 2,59 kN/cm ² ≥ vorh σ_z = 1 900/2 870 = 0,66 kN/cm ²
rechn. Auslastung der Konstruktion für Biegesteifigkeit	100 %	≈100 %	43 %	25 %

Material: *Einsfeld (1973), Feierbach (1973)*

Alle relevanten Festigkeitseigenschaften wurden über Versuche gewonnen.

Im Versuch wurden Dehnungen und Mittendurchbiegungen gemessen. Mit Hilfe dieser Versuche konnte das realistische statische System abgebildet werden. Die Versuche belegen das Langzeitverhalten nur über 1000 Stunden, es ist dies jedoch der in der Folge dieser Versuchsreihe vom Institut für Bautechnik empfohlene Weg zur Einschätzung des Kriechverhaltens.

Ullrich Einsfeld vom Institut für Bautechnik in Berlin, der in den Prüfungsvorgang des fg 2000 involviert war, äußert sich in einem Aufsatz zur Bemessungsmethodik wie folgt *Einsfeld (1973)*:

„Die Sachverständigen aus dem Ausschuß ‚Verstärkte Kunststoffe für tragende Bauteile und Bauarten‘ haben Richtlinien erarbeitet.

Es sind folgende Nachweise notwendig:

1. Kurzzeitversuch an GFK-Proben zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit und Modulen
2. Zeitstandsversuche zur Beurteilung der zeit- und lastabhängigen Verminderungen der Festigkeiten und Modulen
3. ggf. Zeitstandsuntersuchungen unter Medieneinfluß und Temperatur.
4. statische Berechnung zur Abschätzung des Kraftflusses und zur Inter- bzw. Extrapolation
5. Zeitstandsversuche am ganzen Bauteil und erhöhter Gebrauchslast und möglichst anschließender Belastung bis zum Bruch. Hierbei soll das Gesamtverhalten des Bauteils unter erhöhter Last beurteilt werden. Außerdem sollen durch Verformungsmessungen Vergleiche mit der statischen Berechnung gezogen werden und aus dem Versagensbild die Schwachstelle des Bauteiles erkannt werden. Aufgrund der beschriebenen Untersuchungen kann eine Begutachtung erfolgen, die folgendermaßen vonstatten geht: Eine statische Berechnung wird erstellt, dabei Annahme homogenes, isotropes bzw. orthotropes System und lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Weiterhin werden folgende Abminderungsfaktoren für die Kurzzeitwerte aufgestellt:
 - A1 Abminderungsfaktor, der den Einfluß des Kriechverhaltens beinhaltet. Er wird ermittelt aus Zeitstandslinien, die an Versuchen über 10^3 Stunden (42 Tage) gewonnen wurden und auf 10^5 Stunden extrapoliert werden.
 - A2 Abminderungsfaktor für die Alterung und lastunabhängige Änderung der Kunststoffeigenschaften, der aufgrund von Erfahrungen geschätzt wird.
 - A3 Abminderungsfaktor, welcher die Änderung der physikalischen Eigenschaften bei erhöhter Temperatur berücksichtigt. Er wird durch die experimentell bestimmte Wärmeformbeständigkeit bzw. durch Zeitstandsuntersuchungen bei erhöhter Temperatur gefunden.
 - A4 Abminderungsfaktor, der die Schwankungen der Materialeigenschaften bei den verschiedenen Arten der Fertigung abdecken soll (Dies ist heute mit in den Faktor A1 integriert, Anm. d. Verf.).“

Herstellung und Errichtung: www.feierbach.com

8. Juli 1968: Mit insgesamt 10 Handwerkern konnte der Prototyp in nur 11 Stunden aufgestellt werden. Hebezeug bzw. ein Kran waren dabei nicht nötig. Eine 1,25 m auskragende Stahlbetondecke war bereits auf einem konventionell hergestellten 2,50 m hohem Mauerwerkssockel hergestellt worden.

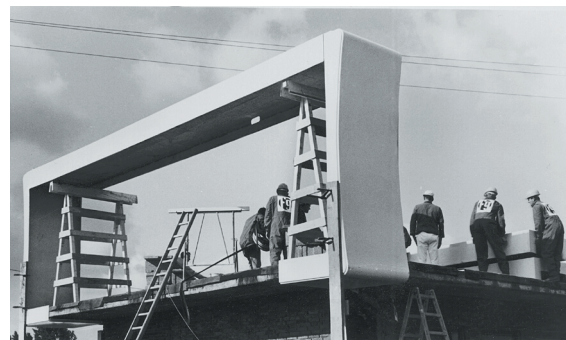
Abb. A 70

Die Breite der Elemente ergab sich exakt aus der Breite der Glasfasernmatten zu 1,25 m *Feierbach/Miske (1970)*



Abb. A 71

Der Aufbau des Prototypen erfolgte ohne Kran innerhalb von 11 Stunden mit 10 Handwerkern *Feierbach/Miske (1970)*



Röhrenhaus Dutler

Lage: erste Präsentation auf OLMA Messe St. Gallen (CH), spätere Standorte sh.

Standdauer

Jahr: 1969

Standdauer: 1970 bis 1981 im Vergnügungspark Castrop-Rauxel, 1981 bis 1994

Campingplatz in Droste, abgerissen

Gebäudetyp: Ferienhaus/ Wohnhaus mit 50 m² WFL

Ausführung: ein Prototyp

Bauberr:

Entwurf: Franz Ulrich Dutler (CH)

Ingenieur: Heinz Isler (CH)

ausführende Firma: Metallwerk AG Buchs (CH) für die Kunststoffröhre

Tragwerkstyp: liegende Zylinderschale, durch Endscheiben ausgesteift, $D = 3,65$ m,

$L = 10$ m, aufgelagert auf BSH-Trägerrost

Stützkernkonstruktion $d = 58$ mm; Deckschichten 4 mm, Kern 50 mm PVC-Hartschaum

Bibliographie:

Attraktion in Hannover: Das erste Kunststoff-Röhrenhaus der Welt aus Palatal. Ludwigshafen, 1970.

– Firmenschrift, Presse-Information

BASF *Information.* Ludwigshafen, (Heft 9) 1970, - Firmenschrift

BASF Unternehmensarchiv, Ludwigshafen, - Archivmaterial

Chemelli, Angelo: Baudokumentation. St. Gallen, 2004, - Archivmaterial

Die BASF auf der Hannover-Messe 1970. Ludwigshafen, 1970. - Firmenschrift, Presse-Information

Diogenes mit Komfort. Ludwigshafen, 1970. – Firmenschrift, Presse-Information

Dutler, F.U.: Kunststoff-Wohnröhre - Leistungsverzeichnis. aufgestellt in CH - 9000 St. Gallen

Erstes Kunststoff Röhrenhaus. In: *Bauen + Wohnen*, Heft 9 (1969), S. 6

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere.* Bauhaus-Universität Weimar : Universitätsverlag, 2005

Girkmann, Karl: *Flächentragwerke.* Wien : Springer Verlag, 1959

Hausakte Röhrenhaus. Stadt Drost, Stadtverwaltung, Bauordnungsamt : 1980

Hintersdorf, G.: *Stützstoffbauweise – Gestaltung und Dimensionierung.* Dresden : Institut für Leichtbau, 1965

Hintersdorf, G.; Wende, A.: Hallen- und kuppelartige Flächentragwerke aus schalenförmigen und gekrümmten GFK-Fertigteilen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 899-902

Hintersdorf, G.; Bernert, J.; Wende, A.: Praktische Dimensionierungsverfahren für tragende GFK-Bauteile. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1966), S. 847-854

Hener, York: Das Superding zum Wohnen. In: *Hannoversche Presse* (1970-04-08)

Hoppe, Peter: Baukonstruktionen unter Verwendung harter Schaumstoffe. In: *Kunststoffe* Heft 10 (1963), S. 766-777

Hütter, Ulrich: Hochbeanspruchte Leichtbauteile aus glasfaserverstärkten Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 6 (1970), S. 318-324

Isler, Heinz: *Statische Berechnung für Kunststoff-Röhrenhaus.* mit Prüfstempel und Prüfbericht Nr. 1 von Zerna, E.h.W., Bochum, 24.07.1981, Prüfnummer 1435 Prüfverzeichnis 1981, Burgdorf : März 1970

Isler, Heinz: *Kunststoffe für tragende Bauteile* - Vortrag SIA Fachgruppe, Burgdorf : 1975, - Schriftenreihe

IBK Bibliothek: Sammlung SL 7.70. Ludwigshafen, 2004, - Archivmaterial

Jackson, Lesley: *the sixties.* London : Phaidon Press, 2000

Krieger, Hans: Haus der Zukunft steht auf Stelzen. In: *Rheinische Post* : (1970-05-12)

Polónyi, St.; Metz, K.: Flächentragwerke aus Glasfaser-Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1968), S. 863-866

Prospekt. In: *Bauen + Wohnen*, Heft 9 (1969), S. 6

Puck, Alfred: Dimensionierung tragender Leichtbaukonstruktionen aus Glasfaser-Kunststoffen. In: *Kunststoffe* Heft 3 (1963), S. 150-157

Puck, Alfred: Zum Deformationsverhalten und Bruchmechanismus von unidirektionalem und orthogonalem Glasfaser/Kunststoff. In: *Kunststoffe* Heft 12 (1965), S. 913-922

R.F.A. „Maison tube“ B.A.S.F. In: *techniques & Architecture* Heft 4 (1971), S. 36

Why not a filament round house? In: *Modern Plastics International* August (1970), S. 14-15

Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (26.05.2004, 12:00-10:5 MEZ): Gespräch mit Herrn Bolmerg

Voigt, Pamela (wissenschaftliche Mitarbeiterin, Bauhaus-Universität Weimar, FOMEKK) (23.09.2004, 10:45 -10:50 MEZ): Gespräch mit Frau Dutler, St. Gallen

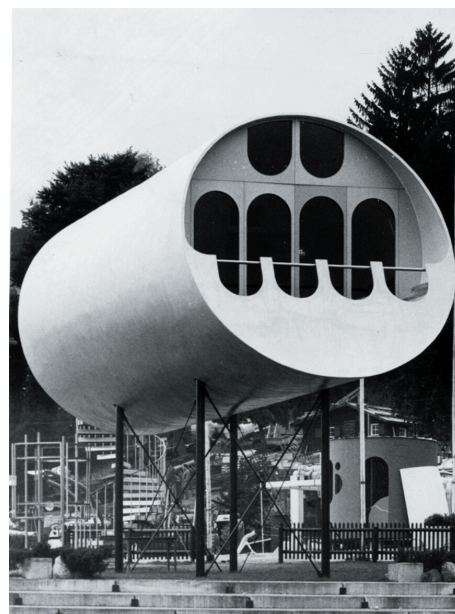


Abb. A 72 Röhrenhaus Dutler 1969
IBK-Bibliothek (2004)

Abb. A 73 Innenansicht Röhrenhaus Dutler
Diogenes mit Komfort (1970)



Zustandekommen des Projektes:

Die Intentionen für den Bau dieser „Wohnröhre“ gingen vom Architekten Dutler aus. Nach mehr als hundert Konstruktionsversuchen entstand der vorliegende Prototyp *Hener* (08.04.1970). Aufgrund der Verwendung von Palatal (Polyesterharz) von BASF wurde der Prototyp von der Firma als Demonstrationsobjekt verwendet und am 24. April 1970 auf der Hannover-Messe ausgestellt. Anschließend kam es in einen Vergnügungspark (Europapark) bei Castrop-Rauxel, wo es bis 1981 stand *Hintersdorf* (1972). Nach dem Verkauf 1981 an einen neuen Besitzer stand das Röhrenhaus bis 1994 als Bungalow auf einem Campingplatz bei Droste. 1994 wurde der Campingplatz verkauft und das Röhrenhaus abgerissen *Voigt/Bolmerg* (26.05.2004).

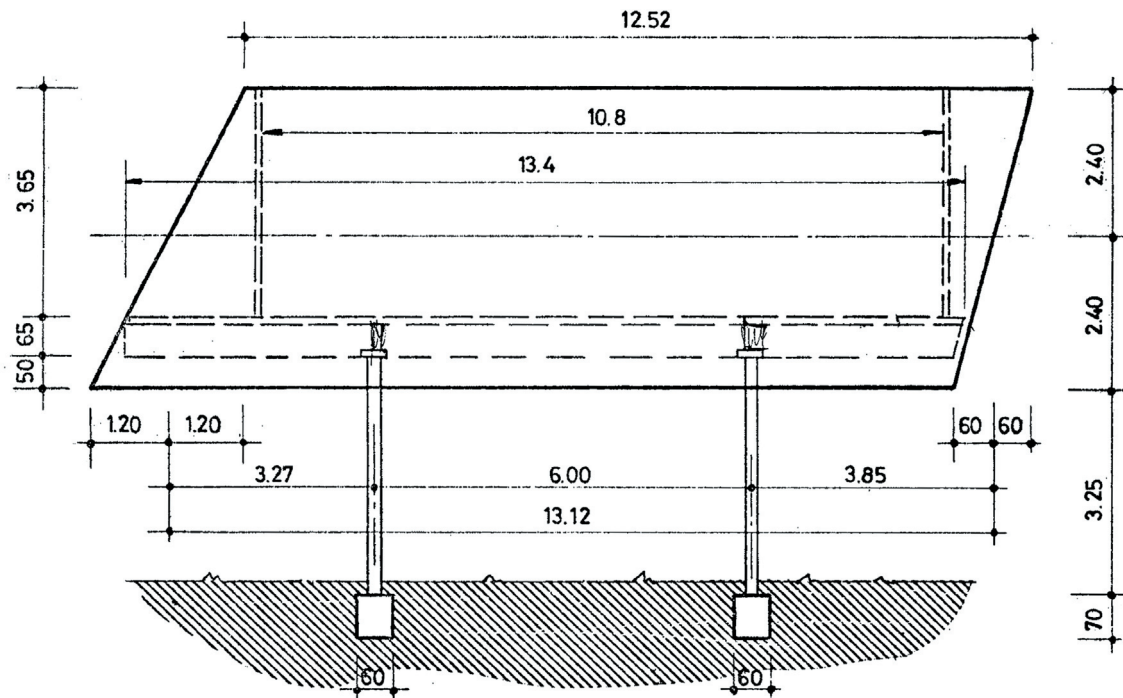


Abb. A 74 Längsschnitt durch das Röhrenhaus Dutler Dutler, Leistungsverzeichnis

Tragwerk:

Der Statiker Heinz Isler gibt eine genaue Beschreibung des Tragwerks in Isler (24.07.1981):

„Das Haupttragelement der Wohnröhre ist ein Tragrost unter dem Fußboden. Zwei Stahlrohr-Gitterträger, respektive verleimte Hetzerbinder von 13,40 m Länge, werden von 4 Stahlrohrstützen getragen. Die auf den Trägern liegenden Querbalken bilden den Tragrost, welcher einerseits die Nutzlast des Fußbodens übernimmt und andererseits das Rohr längs zweier Mantellinien trägt. (Hier hat der Prüferingenieur ein Fragezeichen gesetzt. Es stellt sich die Frage, ob das Rohr tatsächlich auf dem Tragrost aufgelagert ist und in welcher Weise dies konstruktiv gelöst wurde. Anm. des Verf.) [...] Das Rohr liegt längs der beiden Mantellinien auf (die 17 Auflagerpunkte bilden eine Art Linienlagerung). [...] Die Haupttragkonstruktion des Röhrenhauses ist also gänzlich konventionell [...].

Die Außenhaut des Hauses besteht aus einem Kunststoffrohr von 4,80 m Durchmesser und 14,90 m Gesamtlänge. Das Rohr wird in einem Stück hergestellt und besteht aus einer Sandwichstruktur aus zwei Schichten glasfaserverstärktem Polyester (GUP) mit dazwischenliegendem Kern aus Hartschaumstoff.

An den Stirnseiten wird das Rohr durch Endscheiben ausgesteift. Auf der Eingangsseite besteht die Endscheibe aus der Türfront, auf der Balkonseite aus der Fensterfront.

Ein wesentlicher Teil der Rohrlasten infolge Eigengewicht, Schnee und Wind wird über diese Endscheiben auf den Tragrost übergeben.“

Statische Berechnung: Isler (24.07.1981):

Belastungen:

1. Eigengewicht:

Rohdichten: Deckschichten: $1,80 \text{ kg/m}^3$, PVC-Schaum: $0,05 \text{ kg/m}^3$

$g = 0,004 \times 18,0 \times 2 = 0,144 \text{ kN/m}^2$

+50 mm PVC-Hartschaum = $0,050 \times 0,50 = 0,025 \text{ kN/m}^2$

gesamt Eigenlast $g = 0,169 \text{ kN/m}^2$

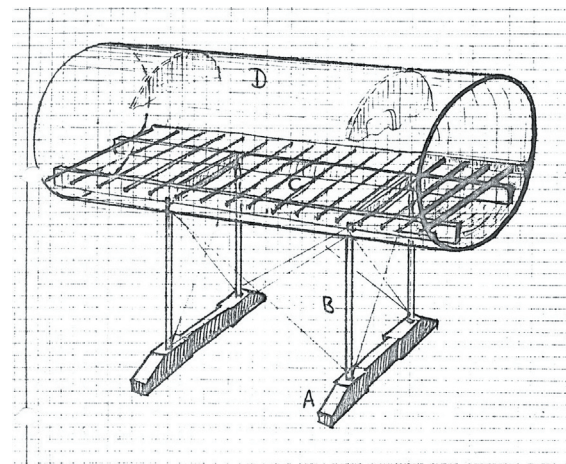


Abb. A 75 Tragsystem Röhrenhaus mit den Positionen:

A Fundationsriegel

B Rohrstützenfachwerk

C Holztragrost mit Boden

D Kunststoffzylinder mit Aussteifungsscheiben

Isler (1970)

2. Schnee:

Es wird die Annahme getroffen, der Schnee bleibt auf dem glatten Rohr bis 45° Neigung liegen, darüber rutscht er ab. Die Schneegrundlast ist 100 kg/m².

3. Wind:

Es wird ein Staudruck von 85 kg/m² angesetzt. Weitere Annahmen sind eine glatte Oberfläche, eine Schlankheit $h/d = 13,13/4,8 = 2,74$. Die Windlasten ergeben sich zu:

Wind senkrecht: $w_I = 0,47 \times 0,85 = 0,40 \text{ kN/m}^2$

Wind parallel: $w_{II} = 1,0 \times 0,85 = 0,85 \text{ kN/m}^2$

4. Nutzlast, Bodengewicht, Unterzugsgewicht:

Für die Schale haben diese Lasten keine Bedeutung, sie werden nur in der Zusammenfassung genannt.

Zusammenfassung der Lasten: (Grundlasten, bezogen auf die Grundfläche)

$g_0 = 0,17 \text{ kN/m}^2$

$g_A = 0,35 \text{ kN/m}^2$

$p = 2,00 \text{ kN/m}^2$

$s = 1,00 \text{ kN/m}^2$

$w = 0,85 \text{ kN/m}^2$

Schnittgrößen, Spannungen:

Die Röhre ist frei aufliegend auf den Endscheiben, diese geben Last an den Trägerrost ab. Die Schalenstatik des Röhrenhauses wurde als wissenschaftliche Aufgabe betrachtet. In einer 10 Seiten langen Herleitung werden die Spannungsgleichungen aus der allgemeinen Membrantheorie mit der Pucher'schen Spannungsfunktion abgeleitet, jeweils für Eigengewicht, Schnee- und Windlasten. Die Windlasten werden näherungsweise als gleichmäßig in elliptischer Form verteilt angenommen, um eine Berechnung von Hand zu ermöglichen.

Die Ermittlung der Membranspannungen erfolgt anhand dieser hergeleiteten Gleichungen, vergleichsweise werden die Spannungsgleichungen für die Zylinderschale nach Girkmann *Girkmann (1959)* herangezogen.

Die Membranspannungen in der Röhre sind sehr klein. Betrachtet man die neuralgischen Punkte am Auflager und in Feldmitte, so ergeben sich Spannungen, die um ein Vielfaches kleiner sind als die zulässigen.

Für den Vergleichsspannungsnachweis der äußeren Schale am Auflager beträgt die Spannung mit 0,24 kN/cm² einen Bruchteil (1/20) der zulässigen mit 4,81 kN/cm².

Ein Stabilitätsnachweis für Beulen wurde nicht geführt. Er kann bei der starken Krümmung der Schale und der geringen Auslastung der Festigkeiten als verzichtbar gelten.

Isler ließ auch Belastungsversuche machen. Ein Exemplar der erster Serie wurde dafür aufgestellt und mit folgenden Belastungen getestet:

1. Belastung außen: 5t Sandsäcke je 50 kg und umlaufendes Gerüst für Personenlast
2. Belastung innen: 5t Sandsäcke zusätzlich
3. Wärme: Heißluftgebläse mit 500 m³/h von 80-100°C

Die Versuche konnten seine Annahmen bestätigen.

Material:

Sandwichkonstruktion Deckschichten variierend 3 mm bis 4,1 mm aus glasfaserverstärktem Polyester (35 % Faseranteil) und 50 mm PVC-Hartschaum.

Folgender Auszug wurde aus *Isler (24.07.1981)* entnommen:

„[...] die folgenden Angaben sind Mindestwerte der Kurzzeitfestigkeiten bei 20 °C. [...] In den statischen Berechnungen sind keine Herstellungstoleranzen berücksichtigt. Für die Festigkeitsverluste infolge Dauerbelastung und Bewitterung (der Außenhaut) sind Abminderungsfaktoren mit 1,2, resp. 1,3 angenommen wurden.“

Die erforderliche Sicherheit berechnet sich demnach wie folgt

$$n = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times n = 1,56 \times n$$

mit den Abminderungen für

Dauerlast	A1=1,2	(üblich 1,6-2,0)
Alterung (UV)	A2=1,3	(üblich 1,2)
Temperatur	A3=1,0	(üblich 1,0-1,2)
Fertigungsungenauigkeit	A4=1,0	(üblich 1,2)

Damit liegt die Abminderung der Kurzzeitfestigkeit mit $A = 1,56$ deutlich unter den üblichen Werten.

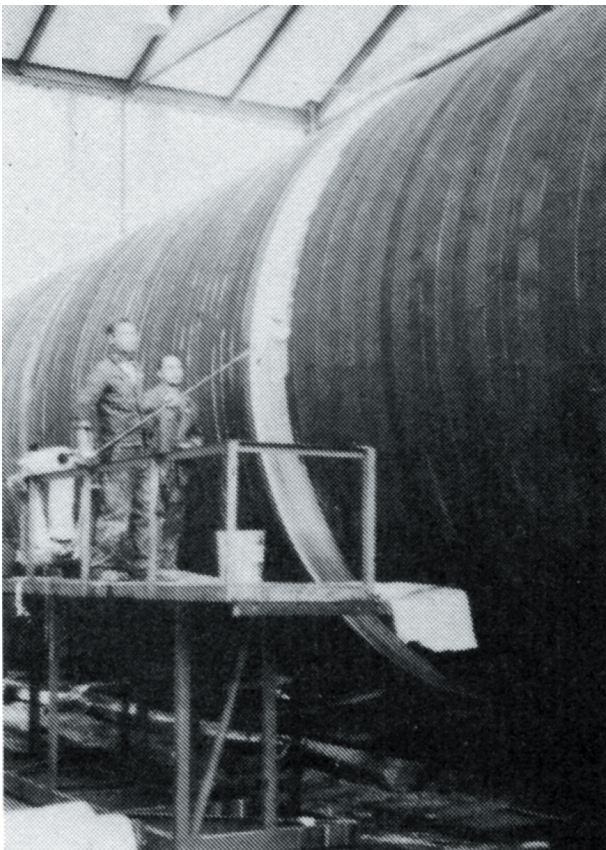
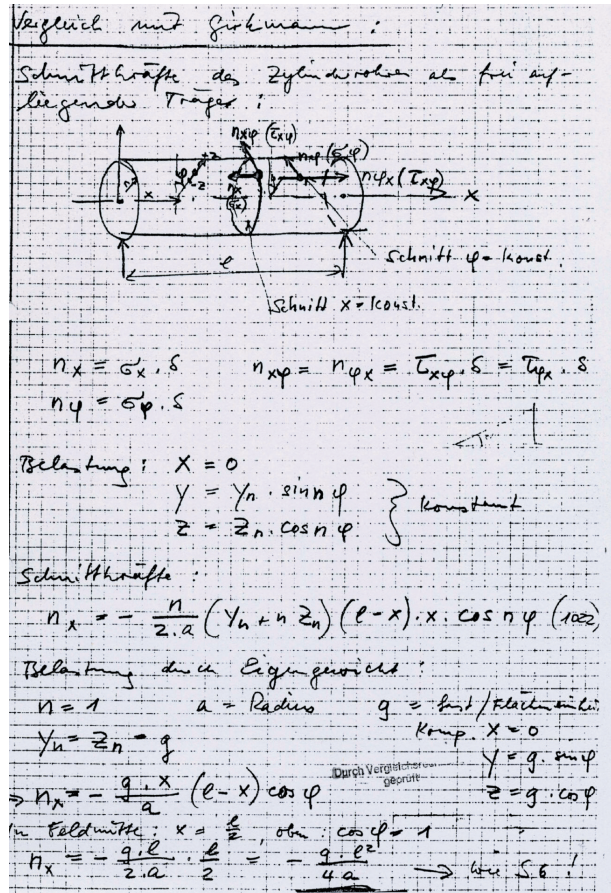
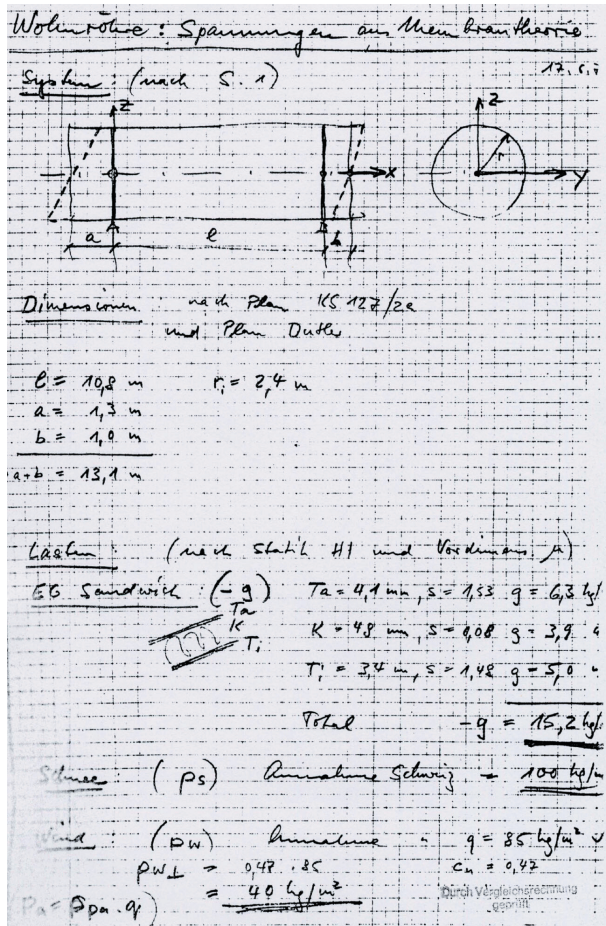


Abb. A 76 und A 77 (oben)
 statische Berechnung zum Röhrenhaus Isler (1970)
 Abb. A 78 (links)

Die Kunststoffröhre wurde von der Firma Metallwerk AG in Buchs (CH) hergestellt. Der Schichtenaufbau erfolgte im für Silos üblichen Wickelverfahren auf einem Stahlkern. Isler (1975)

Mechanische Kennwerte: *Isler (24.07.1981)*

„Die Kennwerte entsprechen den VDI-Richtlinien für UP-Harz mit Mattenverstärkung von 35 % Glasgehalt. Die nachstehenden Eigenschaften sind gleichförmig in allen Richtungen.

Tabelle 1: Eigenschaften von GUP/Außenschicht und Innenschicht_

a) Kurzzeitfestigkeiten

Zugfestigkeit	1 000 kp/cm ²	= 10,0 kN/cm ²
Biegefestigkeit	1 600 kp/cm ²	= 16,0 kN/cm ²
Druckfestigkeit	1 500 kp/cm ²	= 15,0 kN/cm ²
E-Modul aus Zugversuch	80 000 kp/cm ²	= 800 kN/cm ²
E-Modul aus Biegeversuch	80 000 kp/cm ²	= 800 kN/cm ²
G-Modul	33 000 kp/cm ²	= 330 kN/cm ²
Schlagzähigkeit	60 kp cm /cm ²	= 60 kJ/cm ²
Querdehnzahl	0,34	

b) Wärmeverhalten

mittl. linearer Wärmeausdehnungskoeff.	27×10 ⁻⁶ 1/K
Wärmeleitzahl	0,2 kcal/mh°C
Wärmeformbeständigkeit n. Martens	100 °C
G-Modul bei 60 °C	22 000 kp/cm ² = 220 kN/cm ²

c) Alterung

Festigkeitsverlust infolge natürlicher Bewitterung (mitteleuropäisches Klima)
nach 10 Jahren : max. 20 %

Tabelle 2: Eigenschaften der Kernschicht

a) Kurzzeitfestigkeiten

Zugfestigkeit	5-10 kp/cm ²	= 0,05-0,10 kN/cm ²
Biegefestigkeit	5-10 kp/cm ²	= 0,05-0,10 kN/cm ²
Druckfestigkeit	3-8 kp/cm ²	= 0,03-0,08 kN/cm ²
E-Modul (Druck bei 6 kp/cm ²)	120-150 kp/cm ²	= 1,2-1,5 kN/cm ²
Schubfestigkeit	8-12 kp/cm ²	= 0,08-0,12 kN/cm ²
G-Modul	30-50 kp/cm ²	= 0,3-0,5 kN/cm ²

b) Wärme- und Kälteverhalten

Der G-Modul muß über einen Bereich von ca. -20°C bis +80°C möglichst konstant bleiben.
Die übrigen Werte dürfen bei diesen Temperatur-Extremen nicht mehr als 25 % abnehmen.
linearer Wärmeausdehnungskoeffizient < 50×10⁻⁶ 1/°C

c) Alterung

Festigkeitsverlust infolge natürlicher Bewitterung (mitteleuropäisches Klima)
nach 10 Jahren: max. 20 %

Herstellung und Errichtung:

Die Kunststoffröhre wurde von der Metallwerk AG in Buchs hergestellt. Der Schichtenaufbau der Röhre erfolgte im üblichen Wickelverfahren auf einem Stahlkern, der sonst für den Silobau genutzt wurde *Isler (1975)*. Das fertige Röhrenhaus konnte innerhalb einer Stunde auf seinem endgültigen Standort aufgebaut werden. Die Lieferung erfolgte per LKW und Schiff.

Flughafenterminal Dubai

Lage: Dubai Airport

Jahr: 1971

Standdauer: bis heute (2005)

Gebäudetyp: Hallendach großer Spannweite

Ausführung: einmalige Ausführung

Bauherr: Vereinigte Arabische Emirate

Entwurf: Mickleover Ltd. London

Ingenieur: Mickleover Ltd. London

ausführende Firma: Mickleover Ltd. London (GFK-Schirme; Bechtel (USA) für die übrige Konstruktion

Tragwerkstyp: Schirmtragwerk auf Betonstütze, Schirme $19,4 \times 19,4$ m, $H = 4,5$ m
Stützkernkonstruktion $d = 57$ mm; Deckschichten 3,5 mm, Kern 50 mm
Phenol-Schaum

Bibliographie:

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten – Teil 1: Die Pioniere*. Bauhaus-Universität Weimar: Universitätsverlag, 2005

Hintersdorf, Gert: *Tragwerke aus Plaste*. Berlin (Ost) : Verlag für Bauwesen, 1972

<http://www.dubaiairport.com/DIAInternet/Airport+Guide/Departing/>

In: *Detail* Heft 5 (1972), S. 969-972

In: *plastiques batiment* Nr. 119/120, Juillet/Aout (1968), S. 21

In: *plastiques batiment* Nr. 122, Octobre (1968), S. 14

Kunststoff-Überdachungen. In: *Bauen mit Kunststoffen* Heft 1 (1972), S. 44

Makowski, Z.S.: Tragwerke aus Kunststoffen. In: *Bauen + Wohnen* Heft 6 (1969), S. 222-227

Makowski, Z.S.: The Structural Applications of Plastics. In: *Plastics in Building Tomorrow Symposium*, Kopenhagen, 1972

Saechting, Hansjürgen: *Bauen mit Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 1973

Structures en coquilles plastiques pour toitures. In: *plastiques batiment* Nr. 125, Januar (1969), S. 16-18

Williams, R.J.: Dubais Tor zur Welt. in *plasticconstruction* Heft 6 (1971), S. 261-265

Zerning, John: *Design Guide to Anticlastic structures in Plastic*. London : Polytechnic of Central London, 1975 und 1976



Abb. A 79 Flughafengebäude in Dubai, Eingangsbereich
Williams (1971)

Zustandekommen des Projektes:

Der Neubau des internationalen Flughafens Dubai sollte sowohl eine beeindruckende Dachform besitzen als auch mit einem neuen fortschrittlichem Material gebaut werden. Geeignete Partner für diese Bauaufgabe fand man in den Firmen Mickleover aus London und Constain Civil Engineering. Beide Firmen hatten Erfahrungen mit FVK und waren bereits im arabischen Raum tätig.

Tragwerk:

Das Tragwerk wird aus 56 Pilzen mit den Seitenlängen $19,4$ m \times $19,4$ m und einer Höhe von $4,5$ m gebildet. Das Sandwich setzt sich aus zwei unterschiedlichen Teilen zusammen, vier Eck- und acht Seitenteilen. Die Flächen sind ebene Platten. Sie sind durch Eigengewicht auf Druck, durch Wind vornehmlich auf Zug beansprucht. Jeder einzelne Pilz wird auf einer Betonstütze abgesetzt. Die Stützen sind im Fundament eingespannt. Die einzelnen Pilze sind untereinander nachgiebig verbunden. Die Fugenkonstruktion ermöglicht eine Kraftübertragung der Pilze untereinander, somit ist das Gesamtsystem stabilisiert. Andererseits ist der verwendete Schaum der Fugenkonstruktion fähig, sich zu verformen und somit die Dehnungen aus dem unterschiedlichen Temperaturgefälle aufzunehmen (Abb. 84, 85).

Statische Berechnung:

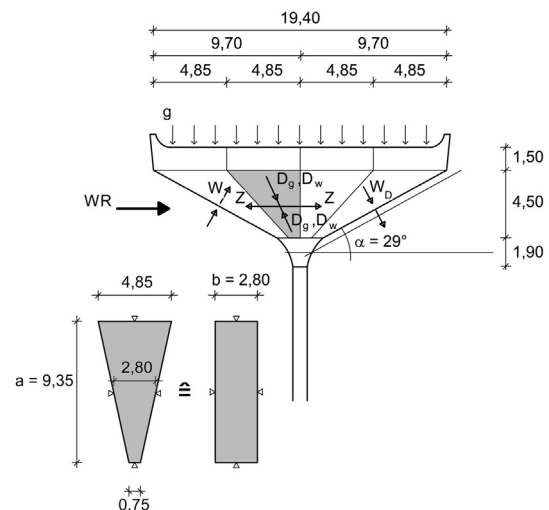
Es konnte keine Bemessung eingesehen werden

In *Genzel/Voigt (2005)*, 244 wurde die Bemessung anhand der bekannten Größen nachvollzogen. Das Material wurde geschätzt.

Abb. A 80 Ansicht des Flughafengebäudes in Dubai
Williams (1971)



Abb. A 81 Beulfelder und Abmessungen der ebenen
Kunststoffschirme



Herstellung und Errichtung:

Die Einzelteile wurden in Großbritannien vorgefertigt und nach Arabien verschifft. Für das Zusammensetzen vor Ort wurde ein Lehrgerüst genutzt. Der fertige Pilz wurde mittels Kran auf die vorbereitete Betonstütze gehoben. Die Betonstütze enthält ein Entwässerungsrohr, die Pilze werden darin entwässert.

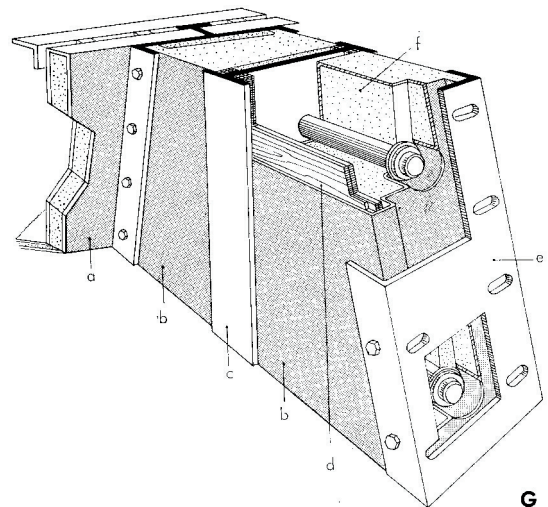
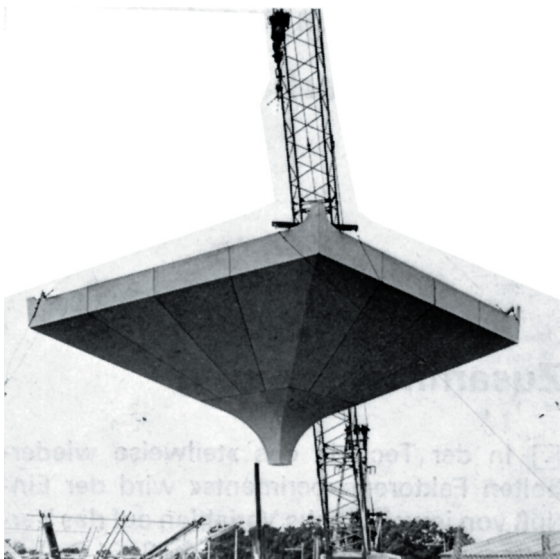
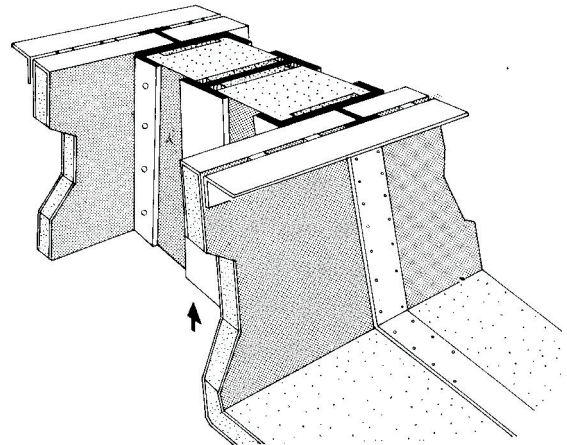
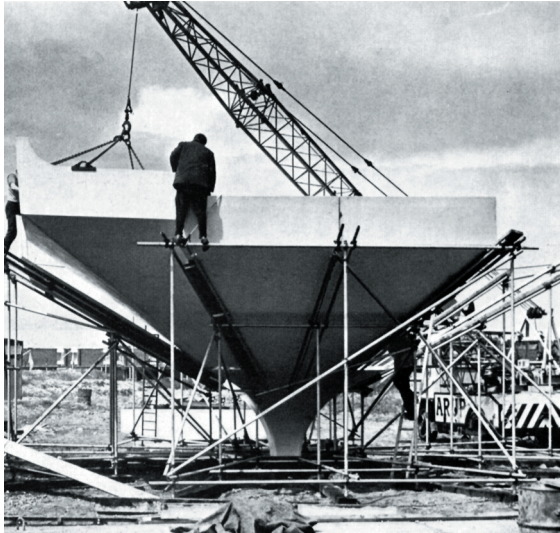


Abb. A 82 und A 83 (links oben und unten)
Zusammenbau und Aufsetzen des Pilzelementes
Williams (1971)

Abb. A 84 und A 85 (rechts oben und unten)
Die Schirme werden über eine undurchlässige Fuge verbunden. In den Stahlkastenprofilen befindet sich ein 30 cm dicker Schaumkern, der die Verformungen aus den unterschiedlichen Temperaturlastfällen aufnimmt, indem er sich zusammendrücken lässt.
a Seitenwand eines Dachschirms
b Kunststoffverbindungsteile
c zentrales doppelt-T-Profil
d Sperrholzausfütterung
e Verbindungsblech
f Polyurethan-Schaumkern
Detail Heft 5 (1972)

Elke Genzel

Simsonstr. 6
04107 Leipzig
geboren am 04.03.1963, in Leipzig,



Schulbildung

9/1981	Erweiterte Oberschule Humboldt (Gymnasium) Leipzig	Abitur
--------	---	--------

Studium

9/1981-9/1982	Vorpraktikum zum Ingenieurstudium Bau- und Montagekombinat Leipzig	
9/1982-4/1987	Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Leipzig, Fachrichtung konstruktiver Ingenieurbau	Diplom sehr gut

Beruflicher Werdegang

4/1987-1/1988	Assistenz an der Technischen Hochschule Leipzig, Sektion Mathematik und Informatik	
1988 -1/1990	Galerie Wort und Werk Leipzig Ausstellungen zeitgenössischer Kunst	Galeristin
3/1990-8/1990	Ingenieurbüro H. Lassahn in Berlin	Statikerin
11/1990-9/1995	Ingenieurbüro für Tragwerksplanung Dr.-Ing. W. Binnewies, Hamburg	Tragwerksplanerin, Sonderkonstruktionen, Denkmalschutz
10/1995-03/1999	Bauhaus-Universität Weimar Fakultät Architektur Lehrstuhl Tragwerkslehre Vertr.prof. Heller	wissenschaftliche Mitarbeiterin

04/1999-10/1999	Bauhaus-Universität Weimar Fakultät Architektur Entwerfen und Tragwerks- Konstruktion Prof. Gump	wiss. Mitarbeiterin Lehrauftrag Tragwerke in der Architektur
11/1999-04/2000	Technische Universität Berlin Fakultät Architektur, Professur Tragwerkslehre/Baukonstruktion Prof. Rückert	wiss. Mitarbeiter
1997 bis 2004	selbständige Tätigkeit in Leipzig	Tragwerksplanung, Tragwerkskonzepte, Wettbewerbe
05/2001-02/2005	Forschungsgruppe Materialgerechtes Entwerfen und Konstruieren mit Faserverstärkten Kunststoffen (FOMEKK) wiss. Mitarbeiter an der Bauhaus-Universität Weimar Prof. Gump, Prof. Ruth	Forschungsarbeiten mit faserverstärktem Kunststoff, Arbeiten zur Ingenieurgeschichte Buch „Kunststoffbauten, Teil 1: Die Pioniere“
08/2005-10/2005	Promotionsstipendium Bauhaus-Universität Weimar	Fertigstellen der Promotion fertiggestellt 06/2006 Disputation am 11.12.2006 mit m.c.l.
seit 10/2006	Ingenieurbüro Wetzels und von Seht freier Mitarbeiter in Hamburg	Tragwerksplanung

**Liste der Veröffentlichungen von
Dipl.-Ing. Elke Genzel**

Bücher

Genzel, Elke; Voigt, Pamela: *Kunststoffbauten - Teil 1: Die Pioniere*. Weimar : Bauhaus-Universitätsverlag, 2005

Tagungsbände

Genzel, E.: Spannbandbrücke aus CFK. In: *Proceeding des 1. Forschungsforum Fomekk*, Bauhausuniversität Weimar , September 2003

Zeitschriften

Genzel, E.: Die Herrin der Kräftelinien trifft die Herren der Motorkraft. In: *Leipziger Blätter* Heft 41 (2002)

Genzel, E.: Olympia in Leipzig? In: *Leipziger Blätter* Heft 42 (2003)

Genzel, E.: Spannbandbrücke aus CFK. In: *Bautechnik* Heft 2 (2003)

Genzel, E.: Mich hält kein Band... das ABSOLUT SCHILLER - Programm mit Helga Ziaja. In: www.othellotheater.de

Genzel, E. Heinz Hossdorf 1925-2006. In: *db* Heft 8 (2006), S. 6-7

Genzel, E.; Voigt, Pamela: Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen.
In: *tec21* Heft 10 (2006), S. 4-9

Skripte

Genzel, E.: Raumabschließende Tragwerke.
Bauhausuniversität Weimar, Fachbereich Architektur,
Professur Entwerfen und Tragwerkskonstruktion,
1.Auflage 1999

Tragende Ideen zum Fliegen
Skript zur Seminaraufgabe „Hangar“ im WS 1996/97
Bauhausuniversität Weimar, Fachbereich Architektur,
Professur Tragwerkslehre, 19.04.1996

Hilfsmittel zur Vordimensionierung von Hallentragwerken
Bauhausuniversität Weimar, Fachbereich Architektur,
Professur Tragwerkslehre, 29.03.1996

Stand: Januar 2007